

文章编号: 1001-4888(2013)06-0732-09

双向受压状态下的混凝土率效应试验研究^{*}

郑金城, 雷敏, 彭刚, 王乾峰

(三峡大学 土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002)

摘要: 利用三峡大学自行研制的大型多功能三轴材料试验机, 完成了 4 种侧应力等级和 3 个数量级加载速率的 C30 混凝土立方体试件双向受压试验, 系统地探讨了不同侧应力和不同加载速率下混凝土的强度特性及变形特性。研究表明, 侧应力和应变速率都能提高混凝土的应变峰值, 但侧应力对混凝土的应变峰值的影响较应变速率的影响大; 随着侧应力的增加, 混凝土的率敏感性逐渐降低; 在有侧应力的情况下, 随应变速率的增加, 混凝土弹性模量变化逐渐减小; 随应变速率的增加, 应力应变曲线上段更加陡峭, 曲线更加饱满, 混凝土剩余强度越来越高; 双轴受压情况下, 混凝土的应力应变曲线下段趋势比无侧应力状态下较平缓, 随侧应力的增加下降段曲线越来越平缓, 混凝土的应力应变曲线更加饱满, 峰值点无明显尖峰出现, 混凝土剩余强度越来越高。

关键词: 混凝土; 双向受压; 应变速率; 试验研究

中图分类号: TU502.6

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-12-087

0 引言

如何评价复杂应力状态下的混凝土结构在地震作用下的抗震安全, 最终归结为混凝土材料在复杂应力状态下的动态性能。目前, 单轴应力状态的混凝土动态性能研究已有大量研究成果^[1,3,4,7], 仅少数学者进行了混凝土双轴动态性能的试验研究^[2,3,6], 但多集中在强度等级较低、尺寸较小的混凝土试验, 现有成果还不足以全面认识混凝土材料在复杂应力状态下的动态抗压性能。

为此, 本文进行了边长为 300mm、强度等级为 C30 的混凝土立方体试块在 4 种侧应力等级(0、6% f_c 、12% f_c 、18% f_c)和 3 个数量级加载速率(10^{-5} /s、 10^{-4} /s、 10^{-3} /s)下的混凝土双轴受压强度试验, 研究了混凝土在不同侧应力、不同应变速率下的强度特性、变形特性及破坏特性。

1 试件的制作和养护

试验采用强度等级为 C30、尺寸为 300mm 的立方体混凝土试件, 水泥为宜昌弘洋水泥有限公司生产的普通 42.5 等级硅酸盐水泥, 细骨料为细度模数 2.4 的河砂, 粗骨料为 5mm~32mm 的连续级配的碎石, 拌合用水采用饮用自来水, 其配合比如表 1 所示。

试件成型并在室温下静置一昼夜, 拆模编号, 放入标准养护间养护 28 天, 为消除龄期因素的影响, 将试件在大气自然环境中搁置 9 个月后再进行加载试验。

^{*} 收稿日期: 2012-07-20; 修订日期: 2013-06-05

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51279092, 11171181)

通讯作者: 彭刚(1963—), 男, 教授, 主要从事混凝土材料与结构动态性能研究。E-mail: gpeng158@126.com

表 1 混凝土配合比(kg/m³)
Tab.1 Mix ration of concrete(kg/m³)

粗骨料	细骨料	水	水泥	水灰比
1150	765.5	168.5	300	0.56

2 试验设备与安装

2.1 设备功能与控制精度

试验采用三峡大学自主开发的 10MN 大型多功能三轴试验机,该机水平最大出力为 5000kN,竖向最大出力为 10MN,试件仓可容纳的最大试件尺寸为直径 500mm、高 1000mm 的柱状体或 450mm 的立方体,具有应力与应变两种控制模式,可实现真三轴与常三轴两种加载方式。系统垂直向有效变形测量范围±50mm,水平向有效变形测量范围±30mm,最大应变速率 $\geq 10^{-2}/s$,系统静态控制精度 $\leq 0.1\%$ 、动态控制精度 $\leq 0.5\%$,试验力测量精度 $\leq \pm 1\%$,变形测量精度 $\leq \pm 0.5\%$,分辨率 $\leq 0.001mm$,机架刚度 $\geq 2GN/mm$ 。

2.2 试件装配过程

试验装配过程分五个步骤完成:(1)将水平方向装样小车推入轨道,把夹具底板安放在小车上,对前后两边各插入一个铁销,扭紧铁销上螺丝,把夹具底板固定在小车上。(2)将试件安放到水平小车的夹具底板上,前后预留 5mm,以防加载时卡住夹具。(3)安装好混凝土试件,卸去小车底板两边的铁销,把小车推入框架内。(4)安装夹具竖向垫块、水平向垫块及减摩板。(5)变形计安装。装配后的情况如图 1 所示。

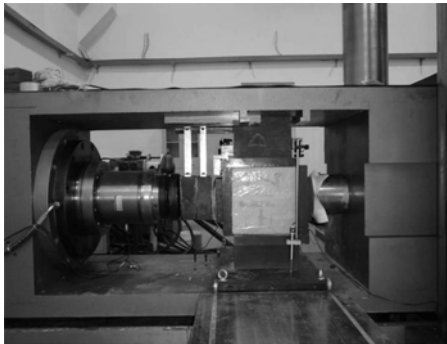


图 1 安装好的混凝土试件
Fig.1 State of the concrete specimens
has be installed



图 2 变形计校正与安装
Fig.2 Deformation gauge installation and calibration

2.3 变形计的安装与校正

试验采用阜新传感器厂生产的 D12 型变形计,精度为 $1.0 \times 10^{-6}m$,量程为 $\pm 20mm$,采集频率为 $0.005s \sim 0.1s$ 。采用磁性支座将变形计固定在混凝土上下与左右垫块之间,使变形计探针的测量范围最大限度固定在试件区间,从而减小机架等变形产生的非线性变形。

试验采用了三种方法确保变形计与装样小车底板垂直:(1)采用高精度全站仪进行测量检测,如图 2 所示。(2)在变形计探针与小车底板处画圆圈作为记号,保证每次安装试件时变形计探针落在所画记号圈内;(3)在安装磁性表座的竖向垫块标好位置,保证每次磁性表座安装在竖向垫块的同一位置,并观察变形计探针是否落在小车上的记号圈内。

2.4 试验加载过程

(1)保证主机、EDC 控制器、PC 控制器正确连接,使系统处于正常的工作状态;(2)打开油泵,油压保持 5MPa,移动钢臂小车到达末端位置;(3)连接好竖向变形计接头,打开 EDC 控制器,用移动控制使小车向上移动,顶起小车,保证小车与底板平行。(4)接触加载,先将试件竖直方向(1 方向)预压至

10kN,使试样与竖向传感器充分接触;(5)用位移控制将竖向力(1 方向)加载至 100kN,移动钢臂小车使其后部垫块与混凝土夹具充分接触,用位移控制将水平力(2 方向)加载到 10kN,保证水平方向上试样与水平向传感器充分接触,再安装水平变形计。(6)转换至力控制模式,将水平力(2 方向)加载到 100kN,再将竖向力(1 方向)卸载到 30kN,然后将竖向力和水平向力同时加、卸载到 30kN。(7)将油压调整到 25MPa,水平向加载至设定荷载,设置好竖向加载速率,位移清零,竖向动力加载至试件破坏,同时采集各向的变形和荷载值。(8)数据保存,拔掉变形计插头,移出钢臂小车,拆下变形计,卸去竖向垫块,移出小车,取出破损试件,试验结束。试验过程中,侧应力采用力控制模式保持恒定,竖向力采用应变速率控制模式加载。

试验设备在试验过程中基本稳定,以侧应力为 0.5 MN、应变速率为 10^{-4} /s 的工况为例,设备在加载试验过程中的状况如图 3 所示。该图表明,侧应力保持恒定,变形 1 的时程为直线,变形 2 的时程略有波动,变形 1 与变形 2 的时程斜率为 1。由此可见,该试验数据有效可信。

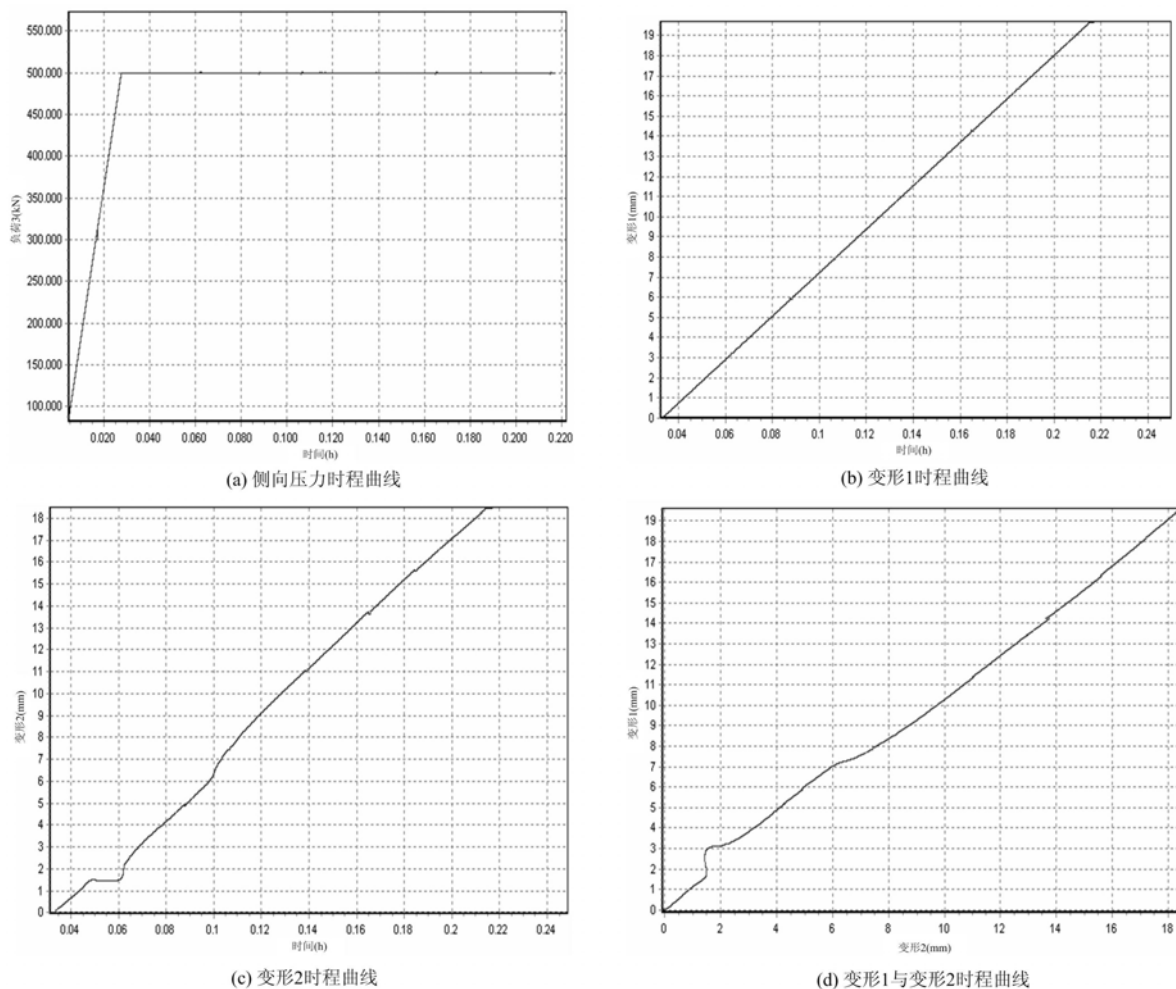


图 3 侧向压力及变形时程曲线(侧应力为 0.5MN)

Fig. 3 Time history curve of lateral pressure and deformation(lateral pressure:0.5MN)

3 试验结果分析

3.1 动态强度特性分析

试验测得混凝土试件在不同侧应力、不同应变速率下的极限抗压强度见表 2。表中 f_c 表示应变速率为 10^{-5} /s 下的单轴抗压强度。

(1) 抗压强度与应变速率的关系

为方便与其他试验者的结果^[1-4]进行对比分析,将表 2 中不同应变速率下混凝土平均极限抗压强

度除以应变速率 $10^{-5}/\text{s}$ 下的极限抗压强度,得到不同侧应力时混凝土的强度随应变速率增加而提高的百分比,如表 3 所示。

表 2 不同侧应力、不同应变速率下混凝土极限抗压强度(MPa)

Tab. 2 Ultimate compressive strength of concrete under different lateral stresses and different strain rates(MPa)

侧压力(MN)	$f_{\text{侧}}/f_c$	编号	应变速率(/s)		
			10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
0	0	A1	43.500	49.089	48.489
		A2	48.311	49.656	53.211
		A3	52.478	51.811	52.444
		均值	48.096	50.185	51.381
		最大误差	9.1%	3.2%	5.6%
0.25	6%	B1	67.322	70.600	70.056
		B2	—	69.533	68.978
		B3	—	66.900	66.867
		均值	67.322	67.500	68.633
		最大误差	—	4.6%	2.6%
0.5	12%	C1	58.900	69.956	73.956
		C2	59.889	69.600	71.689
		C3	62.678	68.167	79.711
		均值	60.489	69.241	76.833
		最大误差	3.6%	1.6%	3.7%
0.75	18%	D1	76.667	71.444	77.244
		D2	73.911	76.567	76.978
		D3	—	75.689	—
		均值	75.289	74.567	77.111
		最大误差	1.8%	4.2%	0.2%
1.0	24%	E1	81.878	—	—
		均值	81.878	—	—

表 3 混凝土峰值强度随应变速率增大的百分比(%)

Tab. 3 Increased percentage of the peak strength of concrete with strain rates increasing(%)

侧压力(MN)	$f_{\text{侧}}/f_c$	应变速率(/s)		
		10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
0	0	0	4.34	6.83
0.25	6%	0	0.26	1.95
0.5	12%	0	14.47	27.02
0.75	18%	0	-0.96	2.42

由表 3 可见,与静态情况相比,在相同侧压力作用下,随应变速率的提高,混凝土抗压强度随之提高,这与单轴动态抗压情况相似;在同一应变速率条件下,混凝土的动态抗压强度随侧压力的提高,呈现

出两种现象:一种现象是,随侧压力的提高,混凝土的动态抗压强度先提高后降低,说明在某一侧压力值以下,侧压力有助于提高混凝土的延性而提高其强度,当超过该侧压力时,侧压力反而对混凝土造成了前期损伤,从而降低混凝土的延性,使其动态抗压强度下降;另一种现象是,在侧压力造成前期损伤的情况下,加载速率的提高,仍可提高混凝土的动态抗压强度。

根据文[1],混凝土峰值强度存在以下关系:

$$\alpha = \frac{f_c^d}{f_c} = a + b \log \frac{c^d}{c} \tag{1}$$

式中, f_c^d 表示不同应变速率下混凝土极限抗压强度; f_c 表示标准静态应变速率时的单轴极限抗压强度; c 为标准静态应变速率($10^{-5}/s$); c^d 为应变速率; α 为强度提高系数; a 、 b 为回归系数。

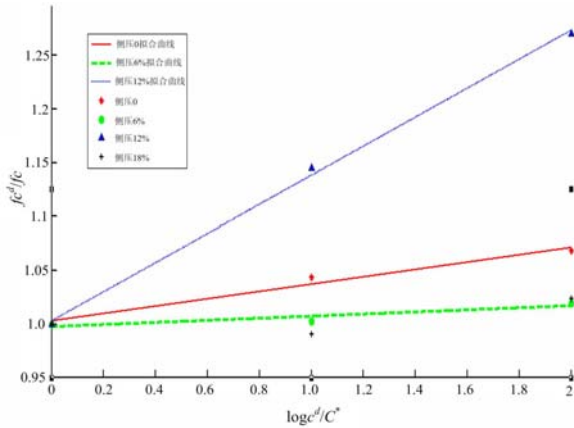


图 4 不同侧应力下峰值强度与应变速率的关系
Fig. 4 The relationship between peak strength and strain rates under different lateral stresses

依式(1)将表 3 数据拟合后如图 4 所示,相关参数见表 4。图 4 与表 4 的结果表明,混凝土在某一侧压力值以下(如 0、6%、12%)时的动态强度与应变速率的对数成线性正比关系,但高于该值时(如侧应力为 18% f_c 时),不再符合此线性关系,再次证明了前面所述观点,也说明文献[1]的应用是有局限性的。

综上所述,在有侧应力的情况下,混凝土的峰值强度与应变速率的对数成线性正比关系;侧应力不同,混凝土的率效应敏感程度不同;当侧应力高于某一值时,混凝土峰值强度的速率敏感性不再符合上述规律。

(2) 抗压强度与侧应力的关系

将表 2 中的混凝土峰值抗压强度值除以相同应变速率下的单轴抗压强度得到不同侧应力时的混凝土强度提高比,结果如表 5 所示。

表 4 拟合曲线参数值

Tab. 4 Fitting curve parameters values

$f_{侧} / f_c$	a	b	相关系数
0	1.003	0.03415	0.976
6%	0.9976	0.00975	0.848
12%	1.003	0.1351	0.998
18%	不符合线性关系		

表 5 混凝土平均峰值强度随侧应力增大的百分比(%)

Tab. 5 Increased percentage of the peak strength of concrete with lateral stresses increasing(%)

侧压力 (MN)	$f_{侧} / f_c$	应变速率(/s)		
		10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
0	0	0	0	0
0.25	6%	39.97	34.50	33.58
0.5	12%	25.77	37.97	49.54
0.75	18%	56.54	48.58	50.08

表 5 的数据表明,侧应力为 6% f_c 与 18% f_c 时,未见其率敏感性;侧应力为 12% f_c 时,具有一定的率敏感性。由此可见,与单轴情况相比,侧应力的存在降低了混凝土的率敏感性。

3.2 竖向峰值应变分析

(1) 竖向峰值应变动态特性分析

将试验所得混凝土试件在不同侧应力水平、不同应变速率下的竖向峰值应变值列于表 6,将各工况下的竖向峰值应变与单轴无侧压下的比值关系列于表 7。由表 6 与表 7 可知,侧应力对混凝土的竖向峰值应变影响较大,在同一加载速率下,竖向峰值应变随围压增加而增加的趋势较明显,尤其在 $10^{-5}/s$ 加载速率条件下,两者基本呈线性增长关系;在同一围压条件下,竖向峰值应变随加载速率的变化而变化的规律性不明显,还有待研究;但在无围压条件下随加载速率的提高而减小的规律与前人研究成果基

本一致。

表 6 双轴加载下混凝土加压向的峰值应变(10^{-3})

Tab. 6 The peak strain of the concrete under biaxial loading pressure(10^{-3})

侧压力 (MN)	$f_{\text{侧}}/f_c$	应变速率(/s)		
		10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
0	0	8.010	7.691	7.476
0.25	6%	10.423	13.230	12.463
0.5	12%	11.471	11.197	14.925
0.75	18%	12.890	10.581	13.393

表 7 各工况峰值应变与单轴无侧压下峰值应变的比值

Tab. 7 Ratio of peak strain of different conditions and the peak strain of uniaxial compression without lateral pressure

侧压力 (MN)	$f_{\text{侧}}/f_c$	应变速率(/s)		
		10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
0	0	1.00	0.96	0.93
0.25	6%	1.30	1.65	1.56
0.5	12%	1.43	1.40	1.86
0.75	18%	1.61	1.32	1.67

(2) 与其他研究成果的对比分析

由表 6 可知,当应变速率为 $10^{-5}/\text{s}$ 时,混凝土的峰值应变随着侧应力的增加近似线性增加,增加速度先减小后逐渐提高。当应变速率为 $10^{-4}/\text{s}$ 、 $10^{-3}/\text{s}$ 时,混凝土的峰值应变随着侧应力的增加先增加后减小。

根据文[1,3],混凝土的峰值应变与侧应力呈下列关系:

$$\epsilon_1 = a\left(\frac{\sigma_2}{f_c}\right)^2 + b\frac{\sigma_2}{f_c} + c \tag{2}$$

式中, f_c 表示标准静态应变速率时的单轴极限抗压强度; σ_2 为侧向应力; a 、 b 、 c 为材料参数,通过拟合可以得到图 5,拟合参数见表 8。

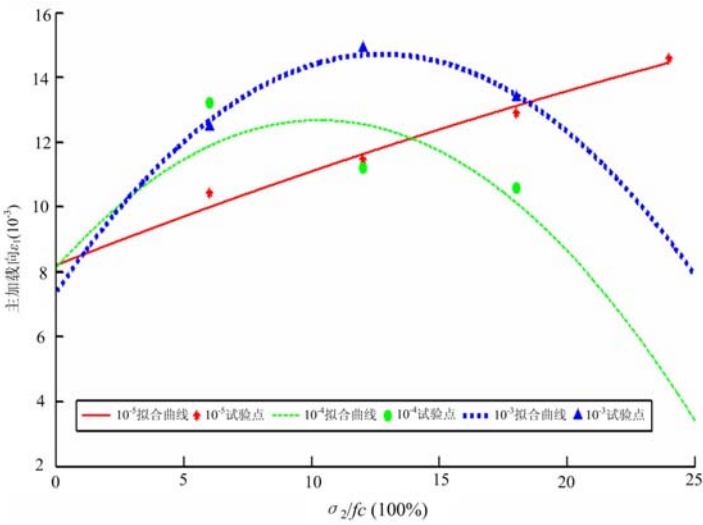


图 5 混凝土峰值应变与侧应力拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of concrete peak strain and lateral stresses

表 8 拟合曲线参数值

Tab. 8 Fitting curve parameter values

应变速率(/s)	a	b	c	相关系数
10^{-5}	-21.05	31.09	8.2	0.9872
10^{-4}	-427.4	88	8.14	0.743
10^{-3}	-452.7	115.2	7.403	0.9965

拟合结果表明,加载速率为 $10^{-4}/\text{s}$ 与 $10^{-3}/\text{s}$ 时,混凝土的竖向峰值应变与侧应力符合二次项系数小于零的二次函数关系,与已有研究成果^[4-7]一致,但加载速率为 $10^{-5}/\text{s}$ 时误差较大,其原因还有待进一步研究。

3.3 混凝土弹性模量

本文依据国家现行规范规定,采用 40% 峰值应力对应的应变计算得出的割线模量作为弹性模量,各工况下的弹性模量列为如表 9。

从表中数据可知,在加载速率为 $10^{-5}/\text{s}$ 时,侧应力对弹性模量的影响规律较为明显,混凝土的弹性模量随侧应力的增大而减小,说明在应变可充分发展的情况下,侧应力可提高混凝土的延性,改善混凝土的耗能特性。但随着加载速率的提高,弹性模量有增有减,其规律性难以确认,还需进一步研究。

4 应力应变曲线分析

本文采用分段式曲线方程拟合,得到如图 6 所示的应力应变曲线。

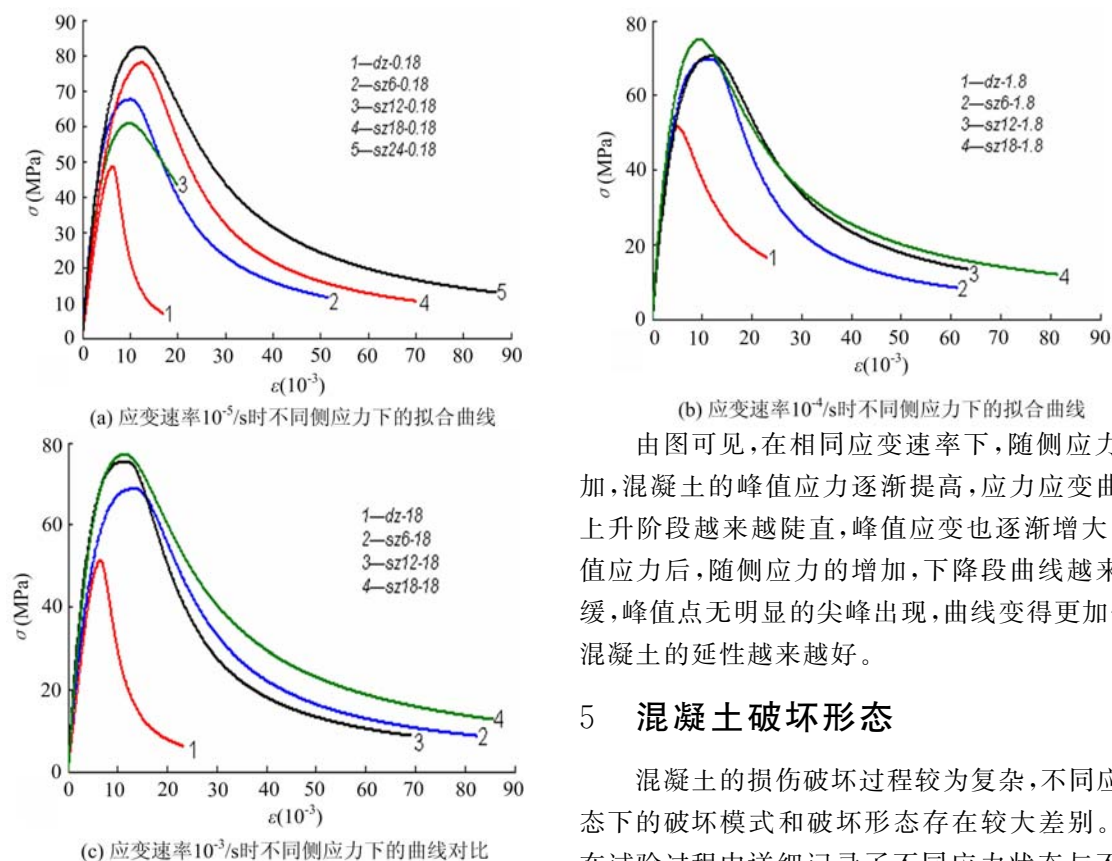


图 6 应力应变拟合曲线对比分析

Fig. 6 Stress-strain fitting curve analysis

破坏形态基本相似。单轴受压时,试件中部混凝土向外四周膨胀并整块剥落,最终形成正倒相接的四角锥破坏形态。双轴受压时,混凝土试件受四面约束,无侧应力向首先出现裂纹并上下逐渐贯穿,导致无侧应力向试件表面混凝土脱落。当变形达到一定量级时,裂缝平行无侧向压力面或无侧应力面成一定角度方向扩展,直至混凝土试件被拉裂而失稳破坏,形成 V 字形裂纹的单向受剪破坏。混凝土破坏时,

表 9 双轴情况下混凝土弹性模量(GPa)

Tab. 9 Concrete elastic modulus under biaxial cases(GPa)

侧压力 (MN)	$f_{\text{侧}}/f_c$	应变速率(/s)		
		10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
0	0	16.588	13.487	13.802
0.25	6%	16.518	15.845	12.265
0.5	12%	11.657	12.934	13.730
0.75	18%	12.427	17.279	16.391

由图可见,在相同应变速率下,随侧应力的增加,混凝土的峰值应力逐渐提高,应力应变曲线的上升阶段越来越陡直,峰值应变也逐渐增大;过峰值应力后,随侧应力的增加,下降段曲线越来越平缓,峰值点无明显的尖峰出现,曲线变得更加饱满,混凝土的延性越来越好。

5 混凝土破坏形态

混凝土的损伤破坏过程较为复杂,不同应力状态下的破坏模式和破坏形态存在较大差别。本文在试验过程中详细记录了不同应力状态与不同加载速率下的试件破坏形态,如图 7 所示。

双轴受压情况下,不同加载速率下的混凝土破坏

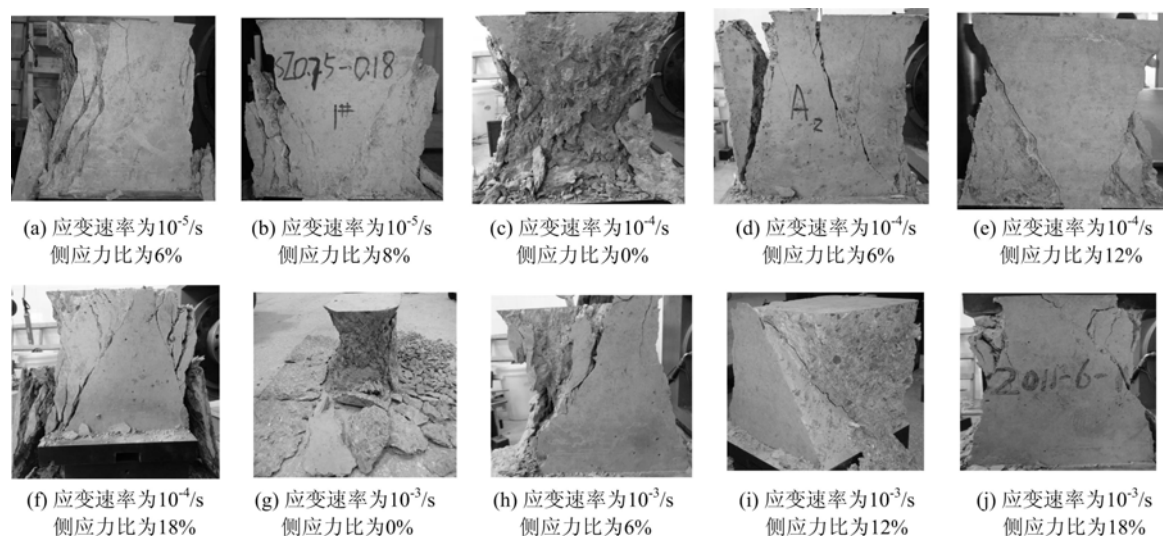


图7 不同侧应力与不同应变速率下的混凝土破坏形态

Fig. 7 Damage forms of concrete under different lateral stresses and different strain rates

竖向有一条贯穿性斜裂缝,从上至下贯穿整个混凝土试件,裂纹宽度为5mm~15mm。随着侧应力的增大,无侧应力向表面裂纹延伸更快,侧向表面裂纹较难向混凝土试件内部扩展,V字形开口逐渐向侧向扩展,V形区域占混凝土试件部位更大。

6 结论

本文研究了不同侧向压力作用下的混凝土动态抗压特性,得出了如下结论:

(1) 在有侧应力的情况下,混凝土的峰值应力与应变速率的对数成线性正比关系;侧应力不同,混凝土的率效应敏感程度不同,与单轴情况相比,侧应力的存在降低了混凝土的率敏感性;当侧应力高于某一值时,混凝土峰值强度的速率敏感性不再符合上述规律。

(2) 侧应力对混凝土的竖向峰值应变影响较大,在同一加载速率下,竖向峰值应变随围压增加而增加的趋势较明显,尤其在 $10^{-5}/s$ 加载速率条件下,两者基本呈线性增长关系;在无围压条件下,峰值应变随加载速率的提高而减小;在同一围压条件下,竖向峰值应变随加载速率的变化而变化的规律性不明显,有待进一步研究。

(3) 在双向受压状态下,随应变速率的增加,混凝土的应力应变曲线上扬段更加陡峭,曲线更加饱满,混凝土剩余强度越来越高。应力应变曲线下扬段趋势比无侧应力状态下更平缓,随侧应力增加,下降段曲线越来越平缓,混凝土的应力应变曲线也更加饱满,峰值点无明显尖峰出现,混凝土剩余强度越来越高。

(4) 侧应力对弹性模量的影响较为明显,随侧应力的增大而减小。

参考文献:

- [1] 吕培印, 宋玉普, 侯景鹏. 一向侧压混凝土在不同加载速率下的受压试验及其破坏准则[J]. 工程力学, 2002, 19(5): 67—71 (LU Peiyin, SONG Yupu, HOU Jingpeng. Experimental Study and Failure Criterion of Compressive Concrete Under Various Loading Rates with Uniaxial Lateral Confinement[J]. Engineering Mechanics, 2002, 19(5): 67—71 (in Chinese))
- [2] 吕培印. 混凝土单轴、双轴动态强度和变形试验研究[D]. 大连理工大学, 2002 (LV Peiyin. Experimental Study on Dynamic Strength and Deformation of Concrete Under Uniaxial and Biaxial Action [D]. Dalian University of Technology, 2002 (in Chinese))
- [3] 吕培印, 宋玉普, 吴智敏. 变速率加载下有侧压混凝土强度和变形特性[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(6): 716—720 (LV Peiyin, SONG Yupu, WU Zhimin. Strength and Deformation Characteristics of Concrete Subjected to Different Loading Rates Combined with Confined Stress[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41

- (6):716—720 (in Chinese))
- [4] 闫东明, 林皋, 刘钧玉, 袁颖. 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 Dong-ming, LIN Gao, LIU Jun-yu, YUAN Ying. 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))
- [5] 闫东明, 林皋. 双向应力状态下混凝土的动态压缩试验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(9):104—108 (YAN Dong-ming, LIN Gao. Effect Of Strain Rate On The Biaxial Compressive Behavior Of Concrete[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9):104—108(in Chinese))
- [6] 闫东明, 林皋, 徐平. 三向应力状态下混凝土动态强度和变形特性研究[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 58—64 (YAN Dongming, LIN Gao, XU Ping. Dynamic Strength and Deformation of Concrete in Triaxial Stress States[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3):58—64(in Chinese))
- [7] 闫东明, 林皋. 不同初始静态荷载下混凝土动态抗压特性试验研究[J]. 水利学报, 2006, 37(3):360—364 (YAN Dongming, LIN Gao. Study on dynamic compressive properties of concrete with different loading paths[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3):360—364(in Chinese))
- [8] 过镇海, 时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 清华大学出版社, 2003 (GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced Concrete Theory and Analyse[M]. Tsinghua University Press, 2003(in Chinese))

Experimental Study of Concrete Rate Effect in Biaxial Compression State

ZHENG Jin-cheng, LEI Min, PENG Gang, WANG Qian-feng

(College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: Biaxial compression experiments of C30 concrete cube specimens subjected to lateral stress of four levels and three orders of magnitude loading rate were completed respectively by using Large-multifunctional Triaxial Testing Machine designed and manufactured by China Three Gorges University. Concrete strength properties and deformation characteristics under the action of different lateral stresses and loading rates were discussed systematically. Results show that both lateral stress and loading rate can improve concrete peak strain, but lateral stress exerts greater influence on the peak strain of concrete. Rate-sensitivity of concrete decreases along with the lateral stress increases. In the case of lateral stress, concrete modulus of elasticity decreases with the increase of strain rate; the ascending part of stress-strain curve becomes steeper, the curve becomes fuller, and the residual strength becomes higher. In the case of biaxial compression, the descending part of stress-strain curve becomes flatter than that of without lateral stress. With the increase of lateral stress, the descending part of stress-strain curve becomes flatter and flatter; the curve becomes fuller without significant spike at peak value, and the residual strength becomes higher.

Keywords: concrete; biaxial compression; strain rate; experimental study