

文章编号: 1000-4750(2006)09-0104-05

双向应力状态下混凝土的动态压缩试验研究

闫东明, *林 皋

(大连理工大学土木水利学院抗震研究室, 大连 辽宁 116024)

摘 要: 利用大连理工大学自行研制、改造的液压伺服静、动态三轴试验系统对 71 个立方体混凝土试件进行双向应力状态下的动态压缩试验, 侧压比例为 0 : 1、0.25 : 1、0.5 : 1、0.75 : 1、1 : 1 五个级别, 加载速率为 10^{-5}s^{-1} 、 10^{-4}s^{-1} 、 10^{-3}s^{-1} 、 10^{-2}s^{-1} 四个量级。系统研究了不同应变速率以及不同应力比例条件下混凝土的破坏模式以及极限强度变化规律。试验表明: 在双向应力状态下, 极限强度随着应变速率有一增加的趋势; 侧向压力的大小是影响破坏模式和极限强度的最重要因素。提出了综合考虑应力组合与应变速率影响的统一强度准则。

关键词: 双向受力状态; 应变速率; 破坏形态; 破坏准则; 混凝土

中图分类号: TU502 **文献标识码:** A

EFFECT OF STRAIN RATE ON THE BIAXIAL COMPRESSIVE BEHAVIOR OF CONCRETE

YAN Dong-ming, *LIN Gao

(Department of Civil Engineering at Dalian University of Technology, Liaoning 116024, China)

Abstract: Dynamic biaxial compressive test of 71 cubic concrete specimens was carried out on the static-dynamic hydraulic servo triaxial test system designed and manufactured at the Dalian University of Technology. The lateral pressure was kept in proportion to the main axis with the ratio of 0 : 1, 0.25 : 1, 0.5 : 1, 0.75 : 1, 1 : 1 respectively. The strain rate was $10^{-5}/\text{s}$, $10^{-4}/\text{s}$, $10^{-3}/\text{s}$, $10^{-2}/\text{s}$, respectively. The variation of fracture mode and the ultimate strength with different stress ratios and different strain rates was studied systematically. Test results show that the dynamic strength increases as the strain rate increases, and that the damage pattern and the ultimate strength are closely related to the magnitude of lateral pressure exerted on the specimen. A unified formula is proposed to reflect all the factors that affect the dynamic properties of concrete under biaxial loading state.

Key words: biaxial stress state; strain rate; failure mode; failure criteria; concrete

大型混凝土结构在其使用过程中, 不可避免地要受到动态荷载的作用, 如大坝受到地震荷载, 海上采油平台受到波浪的作用, 高层建筑受到风荷载的作用等; 而这些大型混凝土结构通常处于复杂的应力状态。因此, 多轴应力状态下混凝土的动态性能是结构设计中应该考虑的一个重要因素。

近几十年来, 在混凝土材料动力性能的研究中取得了不少成果。但多数试验是在单轴应力状态下进行的。Bischoff 与 Perry^[1]总结了荷载速率对混凝土抗压强度影响的研究成果, 对比分析了加载速率对强度、弹性模量、临界应变、泊松比、吸能能力的影响等。Malvar 与 Ross^[2]总结了荷载速率对混凝

收稿日期: 2004-01-02; 修改日期: 2005-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(50139010)

作者简介: 闫东明(1978), 男, 河南南阳人, 博士生, 从事混凝土材料动力性能方法的理论与试验研究;

*林 皋(1929), 男, 江西南昌人, 教授, 博导, 中国科学院院士, 从事大坝抗震等方面研究(E-mail: Gaolin@dlut.edu.cn)。

土单轴动态抗拉强度影响的研究成果。混凝土在多轴应力状态下的动态性能研究也取得了一定成果。如 Bicanic 等人^[3]和 Tedesco 等人^[4]在单轴试验成果的基础上建立了动态本构模型。Gran 等人^[5]对高强混凝土进行三轴动态试验,试验结果表明:在应变速率 1.3/s 和应变速率 5/s 之间建立的动态剪切破坏面比静态条件下的破坏面提高 30%~40%。Takeda 等人^[6]试验研究了有恒定围压混凝土的动态破坏强度准则。Fujikake 等人^[7]采用液压作为圆柱体试件的恒定侧向约束力,在轴向施加动态荷载进行试验,研究了三向应力状态下混凝土的动态破坏模式,建立了动态的破坏准则,并提出了半经验的动态本构模型。双轴受力情况的不同应力途径中,等比例加载和定侧压加载是两种极端情况,这两种应力途径下混凝土的变形规律对推断其它应力途径下的力学特性有着特别的意义;但是双向应力状态下混凝土动态性能的研究工作比较少。宋玉普等人^[8~10]利用改进的液压三轴设备,对立方体混凝土试件在一向施加恒定侧压另一向施加动态的压缩、劈拉荷载,研究了双轴应力状态下的动态强度和变形特性,加载过程采用荷载控制,加载速率范围为 2MPa/s~2000MPa/s,其相应的应变速率范围约为 $10^{-6}/s \sim 10^{-3}/s$ 。

总的看来,混凝土多轴动态试验资料比较有限,现有的多轴动态试验资料大多集中在三向应力状态;双轴应力状态下的动态试验资料比较少,且仅限于研究恒定侧压下的双轴动态特性。在当前国内外的文献中,尚没有发现关于双向比例加载条件下混凝土动态性能研究的详细报道。本文的研究工作将使得对混凝土在多轴应力状态下动力性能的认识更为深入,并为建立混凝土动态本构关系提供必要的试验依据。

1 试验设备及试验技术

1.1 试验设备

试验设备采用大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室的大型静、动态电液伺服试验系统。该系统由电液伺服阀、电子控制线路和三向分别独立的加力架、加载板、液压缸、荷载传感器和位移传感器(LVDT)组成。系统可以实现各种应力比条件下的三向拉、三向压和三向拉压的静、动态试验。试验过程数据采用 Visual C++ 程序编制软件系统进行控制和采集,其最小采集周期为 2 μ s。作动

器响应频率可达到 10.0Hz。其最大加载速率为 5×10^3 kN/s,比例加载控制精度为 1.5%。经过鉴定(2002),达到国际先进水平。本文试验中主应力方向采用最大压力为 2.5×10^3 kN 的作动器,侧压力采用最大压力为 3×10^2 kN 的作动器。主轴方向采用的荷载传感器量程为 50t,从轴荷载传感器量程为 30t,能够确保所采集到荷载值的精度。

1.2 试件的制备

本试验采用边长为 100mm 的立方体试件。设计强度为 10MPa,其配比按重量为水泥 水 砂子 石子 = 1.00 1.02 4.38 5.35。水泥采用大连水泥厂同炉出产的“海鸥牌”32.5R 型普通硅酸盐水泥(即原 425#),粗骨料为连续粒级的碎石,石子的最大骨料粒径为 10mm;砂子为天然河砂,颗粒级配属于级配 II 区,细度模数为 2.66,中砂;所用的拌和水为自来水。试块用钢模人工振捣后在振动台上成型。24h 后脱模,在水中养护 2d,然后放到上覆石棉瓦的养护棚中覆草袋浇水养护至第 28d,其后在自然条件下养护。其 28d 抗压强度(无减磨措施)、劈拉强度分别为 10.7MPa、0.83MPa。试验时混凝土的龄期为 600d $\pm$ 20d。由于 600d 龄期时混凝土的强度发展已经趋于稳定,可以忽略试验过程中龄期不同对强度的影响。在对该批混凝土养护过程中跟踪测量的 37 组抗压和劈拉试验中,没有一组试件中出现三个测量值中的最大值或最小值与中间值的差值都超过中间值的 15%的情况,说明本试验所制作的试件离散性较小,能够确保试验数据的可靠性。

1.3 试验过程

试件侧面与加载板之间采取减摩措施。减摩材料选用塑料薄膜和甘油。具体做法是:在三层塑料布之间夹两层黄甘油,在塑料布与试件受压面之间再涂一层黄甘油,总共三层塑料布三层甘油。

试验过程分三个步骤来完成:一、试验时将试件安装在三轴试验机的加载板之间,调整作动头,使压头靠近试件但不施力。二、通过计算机控制,作动头以设定的位移速率施加到设定的预加荷载值(本试验中为 1.0T)。预加完毕后安放位移传感器(LVDT),每个方向的相对两侧上安放两支,来量测试件变形。三、正式加载。按照试验要求,在计算机程序中设定作动头的位移速度以及各轴出荷载之间的关系并在试验过程中维持恒定,在程序控制下进行加载。同时采集各个轴向的位移和荷载值。

试验完毕, 拆下位移传感器, 取出试件。

本文完成了普通混凝土试块在 5 种应力比例和 4 个数量级加载速率下的双轴压缩试验, 记录了在加载过程中荷载、位移的变化过程。

2 试验结果及分析

在试验的加载过程中, 随着主压力方向荷载的增加, 混凝土试件侧向有膨胀的趋势。本文侧压力方向上作动器的响应频率较高(10.0Hz), 能够确保侧压力与主方向保持恒定的比例。典型的比例保持情况参见图 1, 图中所示为荷载比例为 1 : 1 时应变速率为 10^{-3}s^{-1} 时的实测结果, 可见从轴的应力变化与主轴较为接近, 能够确保试验结果的准确可靠。设备为电液伺服, 可以通过控制作动头的位移速度来实现不同的加载速率。由于试验设备非绝对刚性, 应变速率只能近似地控制为均匀变化, 试验过程中实测的混凝土主压力轴方向应变变化过程如图 1 所示。

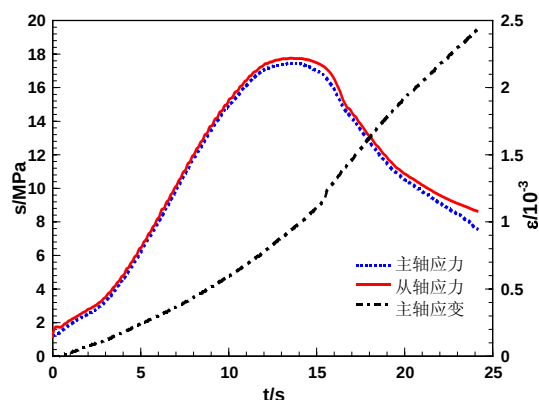


图 1 实测的应力、应变时程曲线

Fig.1 Measured process of stress and strain

2.1 试件破坏形态

在动态荷载下混凝土的破坏形态与静态情况下比较接近。随着应变速率的增加, 在断裂面上有更多的骨料破坏。这可能是在高应变速率下强度提高的一个原因。典型破坏模式如图 2 所示, 可见应变速率对混凝土试件破坏模式的影响不大。在单轴情况下, 由于采取了减磨措施, 表现为典型的柱状破坏。当应力比为 0.25、0.5、0.75 时, 从与侧压力垂直的面上看, 破坏时试件沿与主压力方向成 $10^\circ \sim 45^\circ$ 倾角的裂缝带分成若干部分, 且每个分块中, 混凝土都有部分体积没有受到扰动。在与主压力垂直的方向上表现为与侧压力方向平行的裂缝。而当应力比为 1 : 1 时, 由于试件受到两向相等的

压力作用而引起自由面方向的拉伸应变, 试件的上、下两个自由面呈片状剥落, 破坏面平行于自由面, 表现为片状破坏。见图 3(d)。需要指出的是由于混凝土的非均匀性、粗骨料的形状和分布的随机性, 宏观的平行裂缝有不规则的倾斜角。

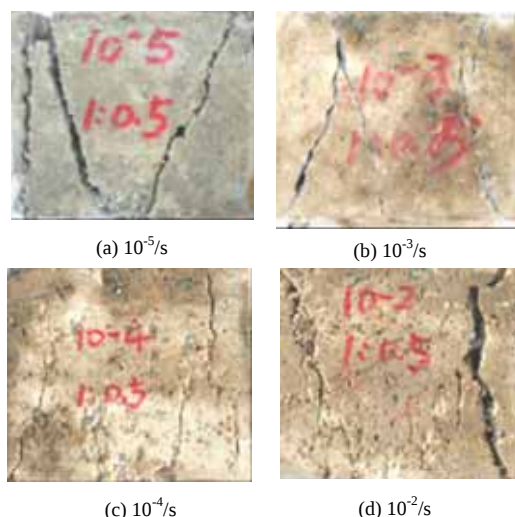


图 2 不同应变速率下的试件破坏形态($\alpha=0.5$)

Fig.2 Typical failure modes of specimens at different strain rates ($\alpha=0.5$)

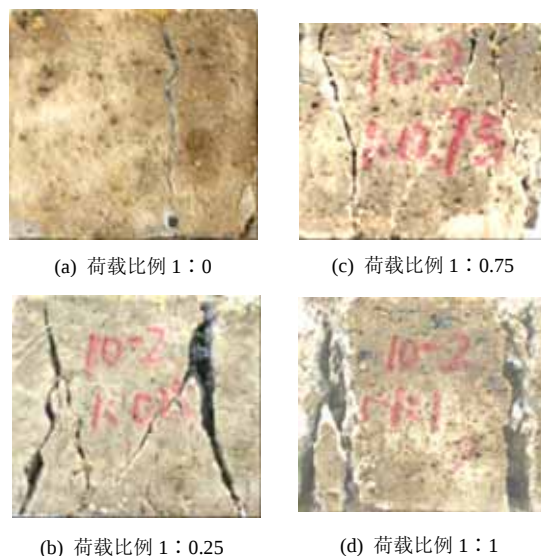


图 3 在加载速率为 $10^{-2}/\text{s}$ 时, 不同应力组合 ($\sigma_1 : \sigma_2$) 下试件的典型破坏形态

Fig.3 Typical fracture modes of specimens under different stress states at $10^{-2}/\text{s}$

2.2 极限强度

测得不同应变速率和不同应力比下混凝土的极限抗压强度见表 1。

可以看出, 在不同的应力组合下, 当应变速率

提高时, 强度均有相应的提高。

表 1 不同应变速率和应力组合下的混凝土强度(MPa)

Table 1 Strength of concrete under different strain rates and different stress proportions (MPa)

应变速率/s	编号	荷载比例($\sigma_1 : \sigma_2$)				
		1 : 0	1 : 0.25	1 : 0.5	1 : 0.75	1 : 1
10^{-5}	1	9.93	15.61	16.08	16.46	14.16
	2	9.67	14.34	15.85	17.03	13.48
	3	9.93	14.64	16.03	15.92	14.37
	4	9.83		16.55	16.15	
	均值	9.84	14.86	16.13	16.39	14.00
10^{-4}	1	10.59	15.28	17.35	17.20	16.07
	2	10.76	15.77	16.40	16.60	14.49
	3	10.52	15.38	16.29	16.46	16.05
	4	10.66		16.66		14.65
	均值	10.63	15.48	16.68	16.75	15.32
10^{-3}	1	11.75	15.66	17.68	17.85	17.40
	2	11.14	16.18	17.21	17.40	16.42
	3	11.25	16.67	17.19	17.97	15.61
	4	11.38			16.94	17.22
	均值	11.38	16.17	17.36	17.54	16.66
10^{-2}	1	12.78	17.30	17.66	18.08	18.00
	2	12.04	16.93	18.23	19.50	17.79
	3	12.15	17.23	19.17	19.62	18.23
	4			17.89	17.44	
	均值	12.32	17.15	18.24	18.66	18.01

通过对试验数据进行分析得知, 混凝土的强度与应变速率的对数之间存在线性关系。假设在每种应力组合情况下混凝土的强度与应变速率的对数之间满足如下方程:

$$\frac{f_{bd}}{f_{us}} = a + b \lg(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s) \quad (1)$$

其中 f_{bd} 为当前应变速率下、当前荷载比例下的极限强度, f_{us} 为拟静态应变速率下单轴抗压强度。 $\dot{\varepsilon}$ 为当前应变速率, $\dot{\varepsilon}_s$ 为拟静态应变速率, 本文取为 $10^{-5}/s$ 。 a , b 为材料参数, 通过拟合得到。对本文数据采用最小二乘法进行拟合, 结果见表 2。

表 2 参数拟合结果

Table 2 Results of simulation

比例	a	b	相关系数
1 : 0	1.00	0.0829	0.949
1 : 0.25	1.50	0.0769	0.834
1 : 0.5	1.63	0.0715	0.795
1 : 0.75	1.65	0.0767	0.774
1 : 1	1.42	0.136	0.853

由于各种应力比例下极限强度对应变速率的敏感性有所不同, 如果把式(1)中拟静态加载速率下单轴抗压强度 f_{us} 替换为当前应力比下的静态强度 f_{bs} , 可以比较不同应力比下的应变速率敏感性。不同荷载比例下强度提高系数与应变速率之间的

关系见图 4。

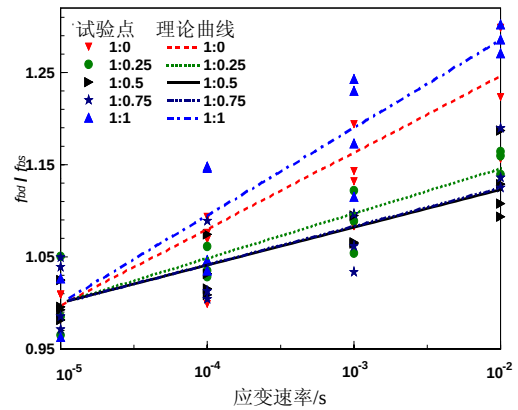


图 4 不同应力比($\sigma_1 : \sigma_2$)下动态抗压强度提高系数与应变速率的关系

Fig.4 Relationship between the dynamic increasing factor and the strain rate under different stress combination

由图 4 可以看出, 在不同的应力组合下, 极限强度对应变速率的敏感程度是不同的。随着侧向压应力比例的增加, 速率的敏感程度并非单调变化趋势。在 1 : 0.5 和 1 : 0.75 比例下, 极限强度对应变速率的敏感程度较低, 而在 1 : 1 和 1 : 0 两种应力比下的敏感程度最为强烈。

同时, 考察在不同应变速率下应力组合对混凝土极限强度的影响。对静态荷载下双向压应力区, Kupfer^[11]提出如下形式的双轴极限强度包络曲线方程:

$$\left(\frac{\sigma_1}{f_{us}} + \frac{\sigma_2}{f_{us}} \right)^2 + c \frac{\sigma_1}{f_{us}} + d \frac{\sigma_2}{f_{us}} = 0 \quad (2)$$

其中 f_{us} 为单轴静态极限抗压强度, c 、 d 为材料参数, 通过拟合得到。

如果以压应力为正, 用当前应变速率下的单轴抗压强度 f_{ud} 替换上式中的静态单轴抗压强度 f_{us} , 则(2)式可以变换为如下形式:

$$\frac{f_{bd}}{f_{ud}} = \frac{(c + d\alpha)}{(1 + \alpha)^2} \quad (3)$$

其中 $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$, 为应力比。对试验得到的数据进行拟合的结果见表 3。

表 3 参数拟合结果

Table 3 Results of simulation

应变速率/(1/s)	c	d	相关系数
10^{-5}	1.021	5.196	0.9172
10^{-4}	1.012	4.947	0.9484
10^{-3}	0.9994	4.897	0.9640
10^{-2}	0.9899	4.796	0.9588

3 破坏准则研究

研究混凝土在双向任意应力组合和任意应变速率下的极限强度规律具有重要的实际意义。通过对试验数据分析发现,在不同应变速率下,混凝土在各种应力比下的强度随应变的变化关系基本相似。如果考虑到应变速率和应力组合情况对混凝土的极限强度的影响,可以将两个因素进行线性组合。即把统一的破坏准则写为:

$$\frac{f_{bd}}{f_{us}} = P_1 + P_2 \lg(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s) + \frac{P_3}{(1+\alpha)^2} + \frac{P_4 \alpha}{(1+\alpha)^2} \quad (4)$$

f_{us} 为混凝土静态单轴抗压强度; P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 为材料参数。利用本文数据进行拟合,得参数 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 分别为-0.446、0.08745、1.433 和 6.42。复相关系数为 0.9580。拟合结果见图 5; 将试验得到的数据同时绘制在图中,可见该双轴统一破坏准则能够较好反映强度与应变速率以及荷载比例之间的关系。

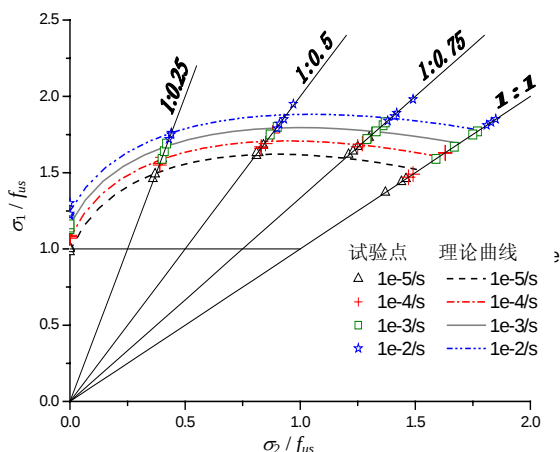


图 5 不同应变速率下的双轴强度包络线(压压区)

Fig.5 Biaxial strength envelopes for concrete under biaxial stress (compression-compression region)

4 结论

(1) 混凝土在较高加载速率下破坏时,有更多的骨料破坏。在单轴荷载下,表现为典型的柱状破坏,当应力比为 0.25、0.5、0.75 时表现为典型的斜剪破坏。

(2) 在较高应变速率下,各种应力状态中的动强度均有一定程度的提高,其提高的幅度并不相同。在实际的设计、校核中应予以考虑。

(3) 混凝土在双轴应力状态下的极限破坏强度与应变速率和应力比例都有依赖关系;应力比例起

主要作用。

(4) 本文所给出的双轴静动统一强度公式,能够较好地描述在不同应变速率下任意双向压应力组合下的动态极限强度规律。

参考文献:

- [1] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates [J]. Materials and Structures, 1991, 24: 425~450.
- [2] Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6): 435~439.
- [3] Bicanic N, Zienkiewicz O C. Constitutive model for concrete under dynamic loading [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1983, 11: 689~710.
- [4] Tedesco J W, Powell J C, Ross C A. Strain-rate-dependent concrete material model for ADINA [J]. Computers & Structures, 1997, 64(5/6): 1053~1067.
- [5] Gran J K, Florence A L, Colton J D. Dynamic triaxial tests of high strength concrete [J]. ASCE J. Engineering Mechanics, 1989, 115(5): 891~904.
- [6] Takeda J, Hiroyuki T. Mechanical behavior of concrete under higher rate loading rate than in static test [C]. Symp Proc. of Mech Behav of Mater, Kyoto, Jpn, 1974. 479~486.
- [7] Fujikake K, Mori K. Dynamic properties of concrete materials with high rates of tri-axial compressive loads [C]. Sixth International Conference on Structures Under Shock and Impact, SUSI VI, Cambridge, UK, 2000. 511~522.
- [8] 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.
Lu Peiyin, Song Yupu, Wu Zhimin. Strength and deformation characteristics of concrete subjected to different loading rates combined with confined stress [J]. J. of Dalian University of Technology, 2001, 41(6): 716~720. (in Chinese)
- [9] 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): 716~720.
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): 716~720. (in Chinese)
- [10] 宋玉普, 吕培印, 侯景鹏. 有侧压混凝土的变速率劈拉强度试验及其破坏准则[J]. 水利学报, 2002, (3): 1~5.
Song Yupu, Lu Peiyin, Hou Jingpeng. Concrete splitting tensile strength and failure criterion for different loading rate and lateral stress [J]. J of Hydraulic Engineering, 2002, (3): 1~5. (in Chinese)
- [11] Kupfer H, Gerstle K H. Behavior of concrete under biaxial stresses [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1973, 99(EM4): 852~866.