第56卷第1期
2016年1月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 56, No. 1
Jan. 2016

文章编号：1000-8608(2016)01-0013-07

饱和大骨料混凝土动态双轴受压力学性能试验研究

王　浩[1,2]，王立成[1]，宋玉普[*1]

（1.大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室，辽宁 大连 116024；
2.辽宁建筑职业学院 建筑经济系，辽宁 辽阳 111000）

摘要： 分别通过试验研究了饱和与干燥大骨料混凝土试件在动态双轴受压状态下的强度特征.试验采用大型混凝土静、动态三轴液压伺服试验系统，设定了4个数量级的应变率(10^{-5}、10^{-4}、10^{-3}、10^{-2} s^{-1})和5种应力比(0∶1、0.25∶1、0.50∶1、0.75∶1、1∶1).根据试验结果，分析了孔隙水对大骨料混凝土动态双轴极限抗压强度的影响，并提出了饱和大骨料混凝土动态受压破坏准则.研究表明，饱和大骨料试件在动态条件下的强度与干燥混凝土试件相比提高明显，而在准静态条件下有所降低.在相同应变率下，与单轴相比，双轴极限抗压强度在应力比为0.50∶1时最大.

关键词： 大骨料混凝土；饱和；双轴受压；动态受压破坏准则

中图分类号： TV431　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.7511/dllgxb201601003

0 引　言

水工大体积混凝土结构在水环境中工作时经常处于饱和状态，如大坝、桥梁基础及墩台等.在使用过程中，除了承受静态荷载的作用外，还要受到复杂的动态荷载的作用.以上因素对混凝土的力学性能影响较大.目前已有大量大骨料混凝土静、动态多轴力学性能研究成果[1-8]，但大多集中在自然状态下.水工混凝土建筑物长期在水压力环境中工作，除了受水压力的影响，更重要的是受渗入到混凝土建筑物中自由水的影响，而且混凝土建筑物在实际工作状态下多处于多轴应力状态，这与混凝土单轴受压状态下的变形和力学性能有所不同.已有试验研究[9-10]表明，混凝土在围压作用下的强度和延性相比单轴状态有了明显的增大.而多轴状态下饱和混凝土极限抗压强度动态试验资料甚少.本文对饱和状态下大骨料混凝土试件进行动态双轴抗压强度试验，以试验为基础，探讨饱和水对大骨料混凝土多轴动态力学性能的影响.

1 试验设计

1.1 试验装置

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、动态三轴液压伺服试验系统，该系统可进行单轴、双轴、三轴应力下的各种静、动态试验，且3个方向的加载头均可以提供最大分别为3 000 kN的压力和1 000 kN的拉力，满足本试验的加载要求.试验时既可以进行荷载控制又可以进行位移控制.

为了使该系统适应本试验混凝土试件尺寸，对试验装置进行了特别改造，设计合适尺寸的加载头，尺寸为245 mm×245 mm×55 mm.加载过程由于加载头自重大很易偏心，在每个加载板上设有球铰装置，这样能够保证试件对中，以保证试验中所采集到荷载值的精度.

1.2 试件设计与制作

试验采用三级配大骨料混凝土试件(250 mm×250 mm×250 mm)，混凝土配合比参照文献

收稿日期： 2015-07-19；　**修回日期：** 2015-11-20.
基金项目： 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金资助项目(IWHR-SKL-201309)；中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT14LK23).
作者简介： 王　浩(1983-)，男，博士生，E-mail：830502wh@163.com；王立成(1975-)，男，教授，博士生导师，E-mail：wanglicheng2000@163.com；宋玉普*(1944-)，男，教授，博士生导师，E-mail：syupu@dlut.edu.cn.

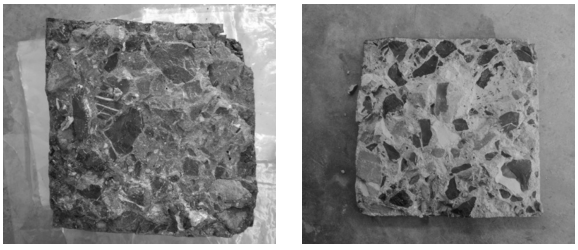
[11],如表 1 所示. 水泥采用大连水泥厂生产的 P. O4. 25 级水泥;粗骨料最大粒径为 80 mm;细骨料为中砂,细度模数为 2. 66;粉煤灰采用国家一级粉煤灰. 每次制作前对砂子及石子的含水率进行测量,减水剂选用大连建筑科学研究院研制的 DK-6 型萘系高效减水剂.

表 1 大骨料混凝土的配合比(每 m^3)

Tab. 1 Mix proportion of dam concrete (per m^3)

水质量/kg	水泥质量/kg	粉煤灰质量/kg	砂子质量/kg	石子质量/kg			DK-6 减水剂质量/kg
				5～20 mm	20～40 mm	40～80 mm	
120	214	53	549	442.5	442.5	590	0.214

混凝土浇筑结束后 24 h 拆模,放置到养护室中养护 90 d 后取出,并将其分为两组,每组 60 个试件. 第一组,放入水槽中浸泡,6 个月后试件质量基本不变,试件破坏截面如图 1(a)所示,由图可见此时试件完全饱和,并测得饱和状态下试件的含水率为 3. 9%;第二组,放入烘干箱中,水分快速蒸发会使混凝土强度降低,为了避免类似情况发生,先 50 ℃烘烤 2 d,然后 60 ℃烘烤 2 d,70 ℃烘烤 3 d,最后 90 ℃烘烤至混凝土的质量基本没有变化为止[6],试件破坏截面如图 1(b)所示,由图可见试件完全干燥.



(a) 饱和试件 (b) 干燥试件

图 1 试件破坏截面

Fig. 1 Cross sections of the fractured specimen

1.3 试验过程

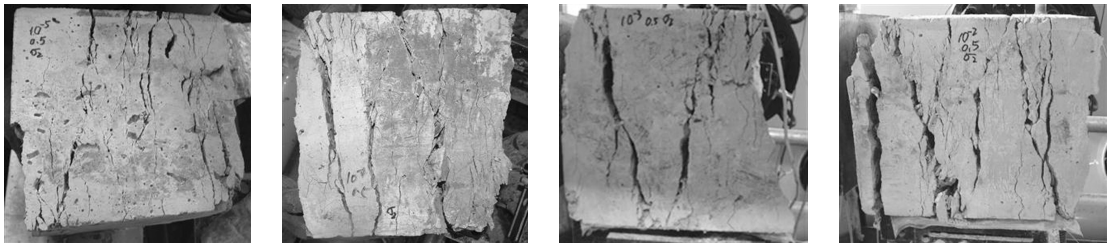
混凝土试件表面有强度偏低的水泥砂浆薄弱层,试验前对混凝土试件表面进行机械打磨,消除加载面不平整对试验结果的影响. 另外,在试件受压方向上,由于加载板与试件表面的摩擦力较大,能够产生对混凝土试件的约束,故采取了减摩措施,减摩材料为塑料薄膜和甘油. 具体做法是在 3 层塑料薄膜之间涂抹 2 层甘油,在塑料薄膜与试件加载面之间再涂 1 层甘油. 加载前,先摆正试件,然后通过荷载控制,进行 3 次预压(预压力分别为 30、60、90 kN). 预压结束后,安装位移传感器,每个加载方向的相对两侧各安装 1 个,取 2 个位移传感器测量值的平均值,作为试件变形值.

本文完成了饱和与干燥大骨料混凝土在 4 种应变率(10^{-5}、10^{-4}、10^{-3}、10^{-2} s^{-1})下的动态双轴受压试验,按两个方向上预先设定的加载比例同时施加荷载,直至试件破坏. 试验的三轴应力比($\sigma_2:\sigma_3$)为 0∶1、0. 25∶1、0. 50∶1、0. 75∶1、1∶1 共 5 种. 每组试验包含 3 个试件,当发现某一试件的强度值大于该组平均值的 15%时,舍弃该数据并补充试件重新试验,以保证数据的可靠性. 试验完毕后,拆下位移传感器,取出试件. 本文规定:压应力与压应变为正且 $\sigma_2 \leqslant \sigma_3$, $\varepsilon_2 \leqslant \varepsilon_3$.

2 试验结果分析

2.1 试件破坏形态

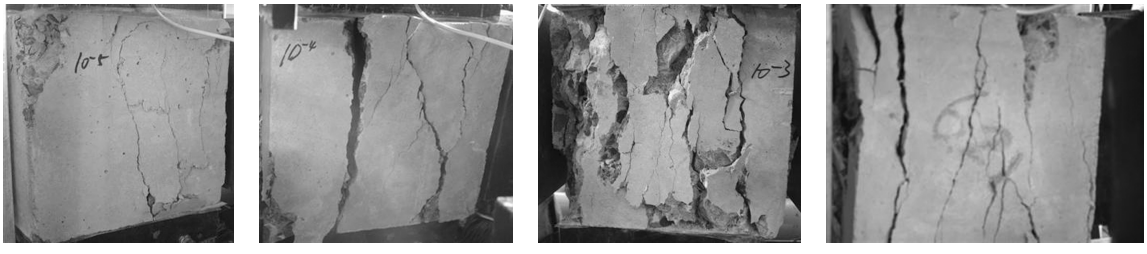
通过试验发现,在任何应力比状态下,试件在受压过程中表面上裂纹数量随着应变率的增大而增多,并且试件破坏时声音愈趋响亮,如图 2 所示. 饱和大骨料混凝土在动态与静态荷载作用下的破坏形态近似. 由于试件与加载头有减摩片作用,在任一应变率下试件在单轴受压时表现为柱状破坏,如图 3 所示. 试件在双轴受压时,在不同应力比下的试件在同一应变率条件下的破坏模式如图 4 所示,试件的破坏形态与应变率的关系不大,主要取决于应力比,双轴受压时,试件侧向受力面上,出现大量与主压力方向呈 5°～40°的斜裂纹,与主应力垂直方向上形成与侧压力平行的裂缝. 当应力比 $\alpha=1:1$时,试件受到相等的双向压



(a) 10^{-5} s^{-1}　(b) 10^{-4} s^{-1}　(c) 10^{-3} s^{-1}　(d) 10^{-2} s^{-1}

图 2　应力比为 0.50∶1 双轴受压试件在不同应变率下典型破坏形态

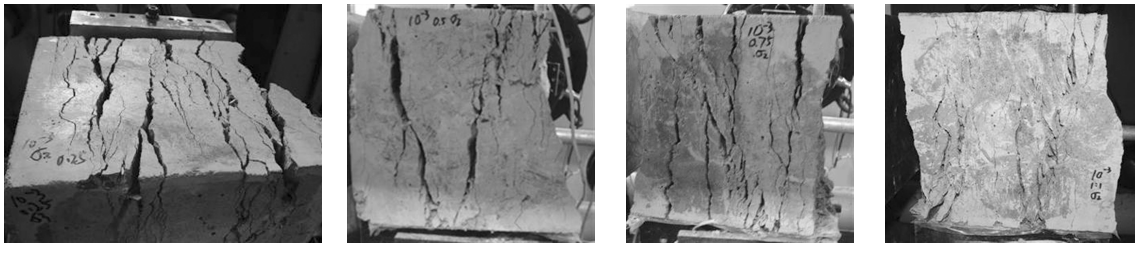
Fig. 2　Typical failure modes of biaxial compression specimens in the stress ratio of 0.50∶1 at different strain rates



(a) 10^{-5} s^{-1}　(b) 10^{-4} s^{-1}　(c) 10^{-3} s^{-1}　(d) 10^{-2} s^{-1}

图 3　单轴受压条件下试件在不同应变率下典型破坏形态

Fig. 3　Typical failure modes of specimens in uniaxial compression at different strain rates



(a) 应力比 α=0.25∶1　(b) 应力比 α=0.50∶1　(c) 应力比 α=0.75∶1　(d) 应力比 α=1∶1

图 4　应变率为 10^{-2} s^{-1} 时试件在不同应力比下典型破坏形态

Fig. 4　Typical failure modes of specimens in different stress ratios at the strain rate of 10^{-2} s^{-1}

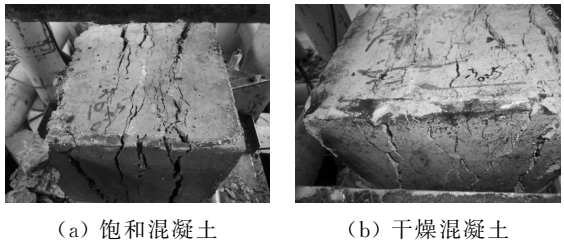
力的作用，变形受到双向应力的约束，在垂直于自由面的方向产生拉伸应变，形成与加载方向平行的裂缝，破坏形状为片状.

含水率对试件的破坏模式影响不大，如图 5 所示，当应变率为 10^{-3} s^{-1}，应力比 α=0.25∶1 时，干燥与饱和混凝土试件均为片状破坏.

2.2　动态极限抗压强度

试验测得饱和与干燥状态下，大骨料混凝土在不同应变率和应力比组合下的极限抗压强度如表 2、3 所示.

由表 2、3 可以看出，当应变率一定时，饱和与干燥大骨料混凝土极限抗压强度都随应力比的增大有先增大再减小的趋势. 当应力比为 0.50∶1



(a) 饱和混凝土　(b) 干燥混凝土

图 5　应变率为 10^{-3} s^{-1}、应力比为 0.25∶1 时饱和与干燥试件典型破坏形态

Fig. 5　Typical failure modes of saturated and dry specimens under strain rate of 10^{-3} s^{-1} and stress ratio of 0.25∶1

表 2 饱和大骨料混凝土试件动态双轴极限抗压强度平均值

Tab. 2 Average strength of saturated dam concrete under dynamic biaxial compression MPa

$\dot{\varepsilon}$ /s^{-1}	0∶1		0.25∶1		0.50∶1		0.75∶1		1∶1	
	σ_2	σ_3	σ_2	σ_3	σ_2	σ_3	σ_2	σ_3	σ_2	σ_3
10^{-5}	0	17.11	6.19	24.76	13.31	26.62	18.36	24.48	22.90	22.90
10^{-4}	0	26.16	6.97	27.89	14.69	29.37	20.99	27.99	27.79	27.79
10^{-3}	0	24.83	8.13	32.51	16.41	32.81	23.67	31.56	29.70	29.70
10^{-2}	0	27.82	8.74	34.97	15.73	31.45	26.29	35.05	34.31	34.31

表 3 干燥大骨料混凝土试件动态双轴极限抗压强度平均值

Tab. 3 Average strength of dry dam concrete under dynamic biaxial compression MPa

$\dot{\varepsilon}$ /s^{-1}	0∶1		0.25∶1		0.50∶1		0.75∶1		1∶1	
	σ_2	σ_3	σ_2	σ_3	σ_2	σ_3	σ_2	σ_3	σ_2	σ_3
10^{-5}	0	20.34	6.63	26.51	13.62	27.24	20.06	26.75	24.69	24.69
10^{-4}	0	21.57	6.75	26.98	14.63	29.25	20.27	27.03	26.31	26.31
10^{-3}	0	23.00	7.01	28.05	15.45	30.90	22.37	29.82	30.18	30.18
10^{-2}	0	24.83	8.00	32.00	16.72	33.43	24.65	32.87	31.15	31.15

时，大骨料混凝土的极限抗压强度最大. 在动态加载条件下，饱和大骨料混凝土的极限抗压强度比干燥大骨料混凝土的极限抗压强度要大；而在准静态加载条件(10^{-5} s^{-1})下，饱和大骨料混凝土的极限抗压强度比干燥大骨料混凝土的极限抗压强度要小，如图 6 所示. 从细观上说[12]，在静态条件下，由于加载速度慢，裂纹开展缓慢，孔隙水容易推到尖端，相当于楔体的楔入作用，加速了裂纹开展，导致静态条件下的饱和混凝土强度降低. 在动态条件下，对于饱和混凝土，除了荷载的惯性作用，孔隙水黏性也是导致混凝土强度提高的主要原因，在快速加载条件下，孔隙水的黏性有很大提高，水的黏性在裂纹开裂方向施加一个反向作用力，阻碍裂纹开展，所以饱和混凝土动态强度大于干燥混凝土动态强度.

2.3 应力-应变曲线

在饱和状态下，大骨料混凝土在不同应力比和应变率下的应力-应变曲线如图 7 所示. 这里规定压应变为正，拉应变为负. 由图 7 可以看出，饱和混凝土试件在同一应力比下，应力-应变曲线的形式基本一致，当应力比为 1∶1 时，主应变和侧应变相同. 当应力比为 0.25∶1 时，试件侧应变为负值. 干燥大骨料混凝土的应力-应变关系与饱和状态的规律相同. 从图中可见，随着应变率的增加，峰值应力点明显上升和左移，说明饱和大骨料混凝土的极限抗压强度逐渐增大. 另外，双轴压应力状态下，饱和大骨料混凝土应力-应变曲线的线性段比单轴受压时有所提高，提高幅度与应力比 α 的大小有关，α 越大，线性段提高的幅度越大.

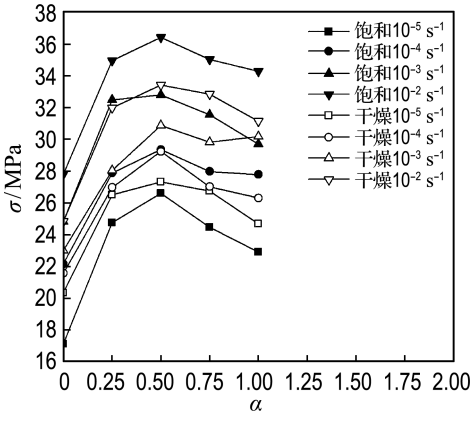
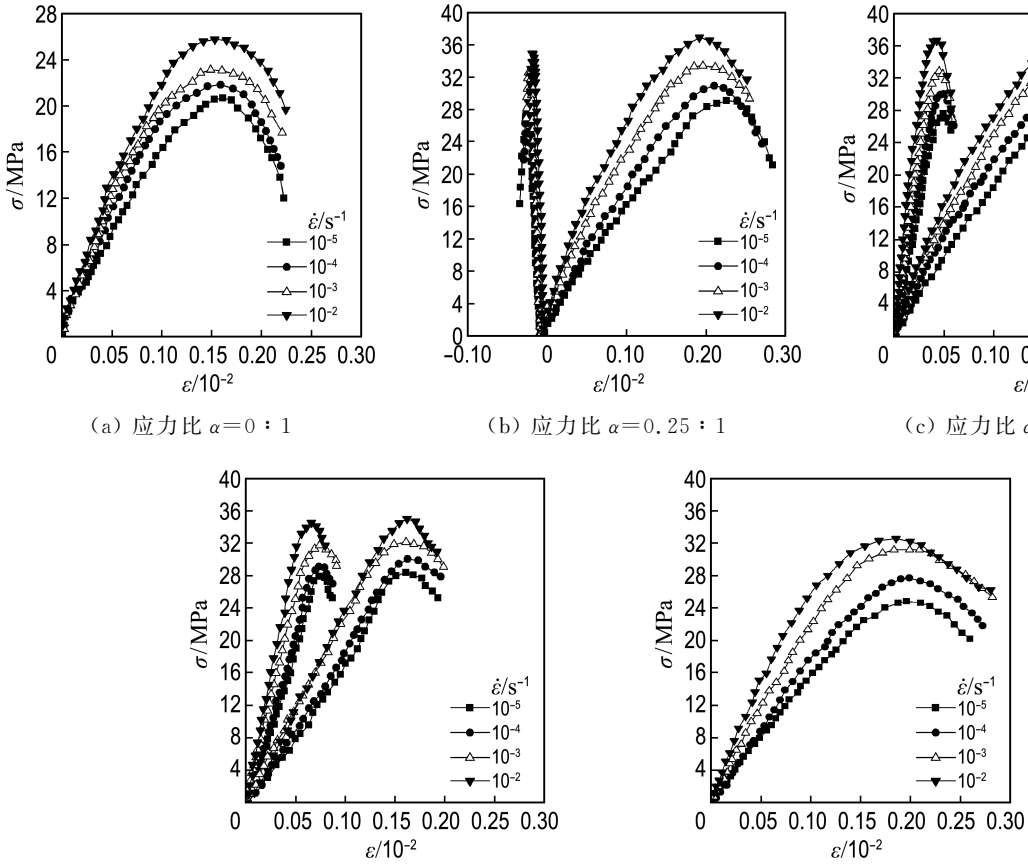


图 6 饱和与干燥大骨料混凝土在各应力比条件下动态双轴抗压强度平均值比较

Fig. 6 Dynamic biaxial compressive average strength of saturated dam concrete at all stress ratios in comparison with that of dry dam concrete



(a) 应力比 $\alpha=0:1$　(b) 应力比 $\alpha=0.25:1$　(c) 应力比 $\alpha=0.50:1$

(d) 应力比 $\alpha=0.75:1$　(e) 应力比 $\alpha=1:1$

图 7　饱和大骨料混凝土应力-应变曲线

Fig. 7　Stress-strain curves of saturated dam concrete

3　大骨料混凝土的动态双轴抗压破坏准则

3.1　动态抗压强度与应变率的关系

根据表 2 的试验数据进行回归分析，得到饱和大骨料混凝土的双轴抗压强度与应变率满足如下的对数关系：

$$f_{bd}/f_{us}=a+b\log(\dot{\varepsilon}/\varepsilon_s) \tag{1}$$

式中：f_{bd} 为混凝土动态抗压强度；f_{us} 为混凝土准静态单轴极限抗压强度（10^{-5} s^{-1}时）；$\dot{\varepsilon}$ 为动态应变率；ε_s 为准静态应变率（10^{-5} s^{-1}）；a、b 为材料参数，由试验数据回归分析得到，如表 4 所示. 由于混凝土是一种多相复合典型非均质材料，具有一定的离散性，图 8 显示饱和大骨料混凝土双轴受压的试验数据与式(1)吻合良好.

3.2　动态抗压强度与应力比的关系

由本文试验数据得到，饱和试件动态抗压强度和应力比的关系为

$$f_{bd}/f_{us}=(c+d\alpha)/(1+\alpha)^2 \tag{2}$$

式中：c、d 为回归参数，如表 5 所示；$0\leqslant\alpha\leqslant1$.

3.3　综合考虑应力比和应变率的统一破坏准则

为便于应用，建立考虑不同应变率和应力比的饱和大骨料混凝土双轴受压状态下的破坏准则. 根据试验数据和文献[13]、[14]，得到破坏准则如下：

$$\frac{f_{bd}}{f_{us}}=P_1+P_2\log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\varepsilon_s}\right)+\frac{P_3}{(1+\alpha)^2}+\frac{P_4\alpha}{(1+\alpha)^2} \tag{3}$$

式中：P_1、P_2、P_3、P_4 为拟合参数.

表 4　回归参数 a、b 和相关系数 r

Tab. 4　The regressive parameters a, b and correlative coefficient r

应力比	a	b	r
0∶1	0.99	0.073 3	0.988
0.25∶1	1.27	0.086 2	0.736
0.50∶1	1.34	0.096 1	0.988
0.75∶1	1.28	0.104 0	0.867
1∶1	1.21	0.114 3	0.925

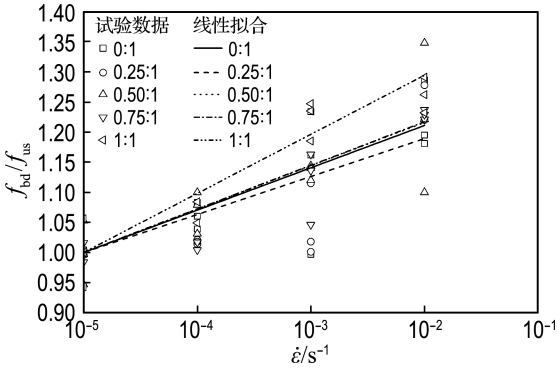


图 8 不同应力比下动态抗压强度与应变率关系曲线

Fig. 8 Relationship curves of the dynamic compressive strength and the strain rate under different stress ratios

表 5 回归参数 c、d 和相关系数 r

Tab. 5 The regressive parameters c, d and correlative coefficient r

$\dot{\varepsilon}/s^{-1}$	c	d	r
10^{-5}	1.012 5	3.974 4	0.968 9
10^{-4}	1.001 4	3.895 7	0.941 4
10^{-3}	0.973 1	4.076 3	0.885 6
10^{-2}	1.001 1	4.048 2	0.998 5

通过回归分析,得到参数 P_1、P_2、P_3、P_4 的拟合值分别为−0.106、0.095、1.060 和 4.310,复相关系数 r=0.952 2. 由图 9 可知,在双轴压作用下,试验数据与式(3)吻合情况良好. 本文建立的破坏准则基本能同时考虑不同应变率和比例加载组合下的动态双轴抗压强度.

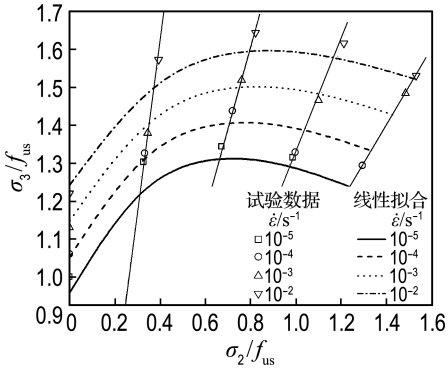


图 9 饱和大骨料混凝土双轴抗压强度包络图

Fig. 9 Strength envelop for saturated dam concrete under biaxial compression

4 结 论

(1)大骨料混凝土的破坏模式主要取决于应力比,而与应变率和含水率关系不大. 单轴受压时,破坏模式为柱状破坏;双轴受压时,则为片状破坏. 随着应变率的增大,混凝土的强度提高.

(2)在准静态条件下,饱和大骨料混凝土的强度和峰值应变低于干燥状态下的. 在动态荷载作用下,饱和与干燥大骨料混凝土的强度和弹性模量都有所增加,但增加幅度不同,饱和大骨料混凝土表现出更强的率敏感性. 所以饱和大骨料混凝土动态抗压强度大于干燥大骨料混凝土动态抗压强度. 极限抗压强度随应力比的增加,有先增大后减小的趋势,当应力比为 0.50∶1 时,极限抗压强度最大.

(3)当应力比为 0.25∶1 时,大骨料混凝土侧应变为负值;当应力比为 1∶1 时,侧应变与主应变相等. 大骨料混凝土在单轴受压状态下的变形明显小于双轴受压下的,试件的峰值应变随应变率的增大而减小.

(4)给出了综合考虑应变率、应力比的饱和大骨料混凝土极限抗压强度的计算公式. 该公式可以用于计算饱和大骨料混凝土在不同应变率、应力比条件下的动态双轴极限抗压强度.

参考文献:

[1] Abrams A D. Effect of rate of application of load on the compressive strength of concrete [J]. **Journal of ASTM International**, 1917, **17**(2):364-377.

[2] Bicanic N, Zienkiewicz O C. Constitutive model for concrete under dynamic loading [J]. **Earthquake Engineering & Structural Dynamics**, 1983, **11**(5): 689-710.

[3] Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. **ACI Materials Journal**, 1998, **95**(6):735-739.

[4] YAN Dong-ming, LIN Gao. Dynamic properties of concrete in direct tension [J]. **Cement and Concrete Research**, 2006, **36**(7):1371-1378.

[5] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates [J]. **Materiaux et Constructions**, 1991, **24**(144):425-450.

[6] Kupfer H, Hilsdorf H K, Rusch H. Behavior of concrete under biaxial stresses [J]. **Journal of the American Concrete Institute**, 1969, **66**(8):656-666.

[7] Yan D, Lin G. Dynamic behaviour of concrete in biaxial compression [J]. **Magazine of Concrete Research**, 2007, **59**(1):45-52.

[8] Dhir R K, Sangha C M A. Study of the relationships between time, strength, deformation and fracture of plain concrete [J]. **Magazine of Concrete Research**, 1972, **24**(81):197-208.

[9] 过镇海. 混凝土的强度和变形:试验基础和本构关系[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
GUO Zhen-hai. **Strength and Deformation of Concrete: Test Foundation and Constitutive Relationship** [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)

[10] Sfer D, Carol I, Gettu R, *et al*. Study of the behavior of concrete under triaxial compression [J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2002, **128**(2): 156-163.

[11] 宋玉普,徐秀娟,刘　浩. 冻融循环后全级配混凝土及其湿筛混凝土的力学性能比较[J]. 水利学报, 2012, **43**(1):69-75.
SONG Yu-pu, XU Xiu-juan, LIU Hao. Comparison of mechanical properties of fully-graded concrete and wet-screened concrete [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2012, **43**(1): 69-75. (in Chinese)

[12] 王海龙,李庆斌. 不同加载速率下干燥与饱和混凝土抗压性能试验研究分析[J]. 水力发电学报, 2007, **26**(1):84-89.
WANG Hai-long, LI Qing-bin. Experiments of the compressive properties of dry and saturate concrete under different loading rates [J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2007, **26**(1):84-89. (in Chinese)

[13] 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)

[14] 吕培印. 混凝土单轴、双轴动态强度和变形试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2001.
LÜ Pei-yin. Experimental study on dynamic strength and deformation of concrete under uniaxial and biaxial action [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001. (in Chinese)

Experimental study of dynamic behavior of saturated dam concrete under biaxial compression

WANG Hao[1,2], WANG Li-cheng[1], SONG Yu-pu[*1]

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Department of Construction Economics, Liaoning Jianzhu Vocational University, Liaoyang 111000, China)

Abstract: The dynamic behaviors of saturated and dry dam concrete specimens are experimentally studied when subjected to biaxial compression stress. The tests are carried out on the large static and dynamic triaxial hydraulic servo test system. Four strain rates (10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2} s^{-1}) and five kinds of stress ratio (0∶1, 0.25∶1, 0.50∶1, 0.75∶1, 1∶1) are taken into the tests. Based on the test results, the influence of pore water on the biaxial dynamic ultimate compressive strength of dam concrete is investigated. A dynamic compression failure criterion of saturated dam concrete is proposed. The test results show that compressive strength of saturated dam concrete is larger than the dry one in dynamic conditions, while is lower at quasi-static conditions. Compared with the uniaxial compression of all the strain rates, biaxial ultimate compressive strength reaches the maximal value at the stress ratio of 0.50∶1.

Key words: dam concrete; saturated; biaxial compression; dynamic compression failure criterion