DOI: 10.11883/1001-1455(2015)06-0864-07

干燥和饱和混凝土动态力学特性及其机理*

张永亮[1,2,3],朱大勇[1,3],李永池[2],姚华彦[1,2,3],黄瑞源[2],李煦阳[2]

(1.合肥工业大学土木与水利工程学院,安徽 合肥 230009;
2.中国科学技术大学近代力学系,安徽 合肥 230027;
3.合肥工业大学安徽土木工程结构与材料省级实验室,安徽 合肥 230009)

摘要:采用分离式 Hopkinson 杆装置,对混凝土进行干燥和饱和状态下的 SHPB 实验,并与准静态实验进行对比。结果表明:干燥和饱和混凝土均具有明显的应变率效应,中等应变率条件下的应力应变曲线上升段比准静态的曲线陡;饱和混凝土动态强度提高的幅度接近干燥混凝土的 2 倍,具有更强的应变率敏感性;存在一个应变率临界值,仅当应变率大于临界值时,饱和混凝土的动态强度才大于干燥混凝土的的动态强度;基于实验结果,给出了不同饱和度混凝土强度与应变率的关系。

关键词:固体力学;临界应变率;SHPB 试验;混凝土材料;Stefan 效应

中图分类号:O347.3　　**国标学科代码**:1301520　　**文献标志码**:A

随着混凝土含水率的增加,混凝土的力学性能发生改变,研究表明,饱和状态下的混凝土结构在复杂受力状态下的力学性能与干燥状态下的差别较大[1-2]。探讨饱水混凝土的力学性能对于水下爆破开挖、水中建筑物拆除、大型水下建筑物抗震安全评价等有着重要的意义。

在水环境下混凝土类材料的力学性能研究方面,目前已有一些学者开展了相关的研究,但主要局限于准静态情况,其动态力学性能的研究方面还存在不足:P. Rossi 等[3-4]讨论了动态拉伸应力下混凝土中的自由水对混凝土的作用,从机制上对湿态混凝土力学性能的变化进行解释,但对湿态混凝土的抗压强度没有研究;P. K. Mehta 等[5]和 X. H. Vu 等[6]研究了多种含水率和干燥混凝土的强度特性,但仅描述了这一实验现象,没有深入探讨水的作用机理;王海龙等[7]对比了不同加载速率条件下的干燥和饱和混凝土抗压强度变化,但其加载速率均小于 10^{-4} s^{-1},仍属于准静态加载范畴。

材料的力学性能在应变率比较高时通常会发生较大的变化,此时建立材料的本构关系就需要考虑惯性力和应变率对材料性能的影响。目前应用于应变率在 $10^{-6}\sim10^{4}$ s^{-1} 的材料试验装置及其测量技术已趋成熟,大口径分离式 Hopkinson 装置是实现对混凝土材料中等应变率加载的有效途径之一,而饱和混凝土在中等应变率 $10^{0}\sim10^{2}$ s^{-1} 条件下压缩加载的动态力学特性研究极少。本文中,开展干燥和饱和混凝土的冲击压缩动态力学特性实验,对 2 种状态混凝土在中等应变率条件下力学性能进行研究,并进行理论上的分析探讨。

1 实　验

1.1 实验设备

静载单轴压缩实验在 MTS810 型材料试验机上完成。动态实验是在∅75 mm 的大口径分离式 Hopkinson 装置上进行的,如图 1 所示。该装置的入射杆长 5 461 mm,透射杆长 3 485 mm,子弹长 50 mm。输入杆和传送杆上贴有应变片用以记录波形。

SHPB 方法建立在 2 个基本假定基础上:(1) 杆中一维应力波假定,即不考虑非轴向应力;(2) 试件均匀假定,即应力应变沿试件长度均匀分布。根据假设,有:

* **收稿日期**:2013-12-04;**修回日期**:2014-04-02
基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(11102205,11202206);中国博士后科学基金项目(20100480685)
第一作者:张永亮(1987—),男,博士研究生;**通讯作者**:姚华彦,yaohuayan@163.com。

$$\varepsilon_i(t)+\varepsilon_r(t)=\varepsilon_t(t) \tag{1}$$

式中：$\varepsilon_i(t)$、$\varepsilon_r(t)$和$\varepsilon_t(t)$分别为入射波、反射波和透射波产生的应变。基于式(1)可得到如下关系：

$$\dot{\varepsilon}=2\frac{c_0}{L_s}[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_t(t)] \tag{2}$$

$$\varepsilon=2\frac{c_0}{L_s}\int_0^t[\varepsilon_i(t)-\varepsilon_t(t)]\,\mathrm{d}t \tag{3}$$

$$\sigma=(A_0/A_s)E_0\varepsilon_t(t) \tag{4}$$

式中：ε 和 σ 为试件的应变和应力，$\dot{\varepsilon}$ 为应变率，c_0 是杆中弹性波速度，E_0 是杆的弹性模量，A_0 是杆的横截面积，A_s 和 L_s 分别是试件的原始截面积和原始长度。

由实验得到输入杆和输出杆中的应变波形，通过式(3)～(4)可求得材料在某一应变率下的应力应变曲线，相应的应变率可由式(2)得到。

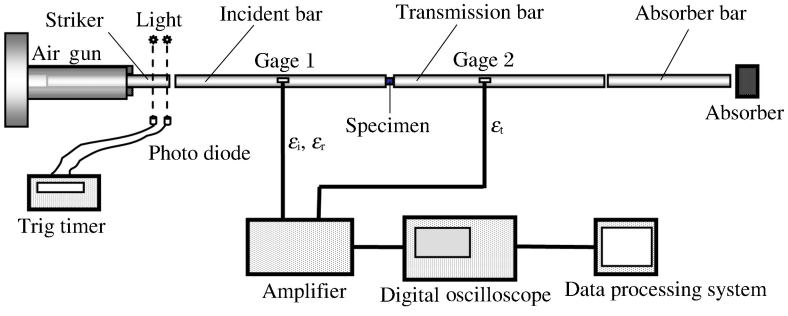

图 1 大口径分离式 Hopkinson 压杆示意图

Fig. 1 Schematic diagram of large diameter split Hopkinson pressure bar

1.2 实验材料和方法

MTS 实验所用试样为∅50 mm×100 mm 的圆柱体，两端表面平行度在 0.05 mm 以内，表面平整度在0.02 mm 以内，试样如图 2(a)所示。SHPB 实验所用试样为∅75 mm×37 mm 的圆柱体，其表面平行度和平整度与静态实验试样相同，试样如图 2(b)所示。2 个实验中的试样均分为 2 种状态：(1) 干燥状态，试样制备好自然风干，然后开展实验；(2) 饱和状态，试样在水中自由吸水至饱和后开展实验。共开展干燥和饱和状态的准静态单轴压缩实验各 5 个，以及不同速率的 SHPB 实验各 12 个。

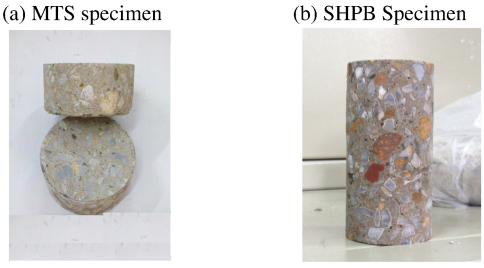

图 2 C40 混凝土试样

Fig. 2 C40 concrete test specimens

准静态实验中加载速率为 4×10^{-4} s^{-1}。SHPB 实验中，将干燥和饱和混凝土分别以 4 个为一组进行分批，通过调整气压控制加载速率，依次进行加载速率从低到高的动态冲击压缩实验。

2 实验结果及分析

2.1 静态力学特性

在准静态加载条件下，对实验结果取平均值，得到干燥和饱和混凝土的强度和峰值应变。实验结果见表 1，其中：σ_0 为平均强度，ε_0 为平均峰值应变。表 1 的结果表明：饱和混凝土的静态强度比干燥状态的静态强度低约 37.8%，而其峰值应变(峰值应力处的应变)小 23.6%。

表 1 准静态条件下的实验结果

Table 1 Results under quasi-static conditions

状态	σ_0/MPa	ε_0	$\dot{\varepsilon}$/s^{-1}
干燥	49.84	0.006 19	0.000 4
饱和	36.17	0.005 01	0.000 4

2.2 动态变形特性

选取不同应变率条件下干燥和饱和混凝土的实验数据，绘制应力应变曲线，如图 3～4 所示，其中：$\dot{\varepsilon}=4\times10^{-4}\ s^{-1}$对应的曲线为准静态应力应变曲线。从实验结果可以看出，干燥和饱和混凝土的动态应力应变曲线与准静态下的应力应变曲线有显著差别，上升段都较陡，表明动态加载条件下的弹性模量大于静态加载条件下的弹性模量，且在中等应变率条件下的峰值应变均小于准静态条件下的峰值应变。

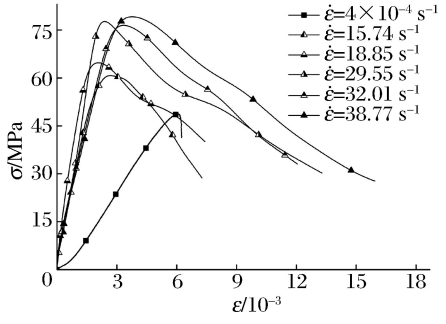

图 3 干燥混凝土应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of dry concrete

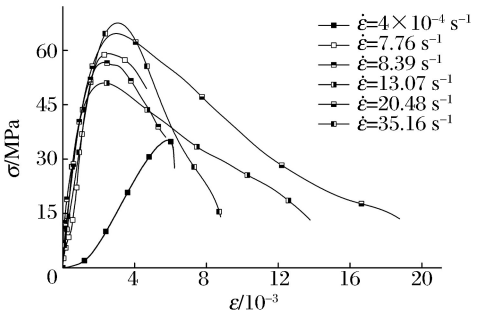

图 4 饱和混凝土应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of saturated concrete

为进一步对比分析相近应变率下水对混凝土动态力学特性的影响，结合实验的加载应变率范围，选取应变率相近的试样数据进行分析，得到的应力应变曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出，干燥和饱和混凝土的动态应力应变曲线的形状是基本相同的，但在峰值应力之后，饱和混凝土的曲线下降较缓，这说明饱和混凝土具有一定的延性。

对有效 SHPB 实验试样的峰值应变 ε_p 进行统计，得到它们的关系趋势线，如图 6 所示。在中等应变率条件下，干燥和饱水混凝土的峰值应变均随着应变率的增大而增大，并且饱和混凝土的峰值应变比干燥混凝土的峰值应变大，而随着应变率的增加两者之间的差值逐渐减小。

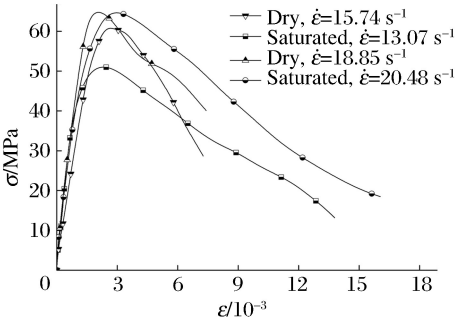

图 5 干燥和饱和混凝土的应力应变曲线

Fig. 5 Comparison of stress-strain curves of dry and saturated concretes

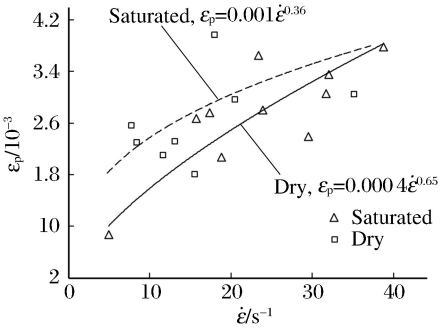

图 6 干燥与饱和混凝土峰值应变与应变率关系曲线

Fig. 6 Comparison of peak strain-strain rate curves of dry and saturated concretes

2.3 动态强度特性

实验得到的干燥与饱和混凝土的强度 σ_b 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的关系如图 7 所示。结合已有混凝土动态特性的应变率依赖特性研究成果[8-11]，以单轴压缩平均抗压强度 σ_0 及其对应的应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 为归一化因子将应力和应变率进行量纲一化，得到干燥与饱和混凝土的动态强度-应变率对数曲线，如图 8 所示。混凝土的干燥和饱和状态下的动态强度-应变率关系拟合结果如下：

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_{d0}}=0.139\ \ln\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_{d0}}-0.191 \tag{5}$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{s0}} = 0.242\ln\frac{\dot{\varepsilon}_s}{\dot{\varepsilon}_{s0}} - 0.826 \tag{6}$$

式中：σ_d 和 σ_s 分别为干燥和饱和混凝土的动态强度，σ_{d0} 和 σ_{s0} 分别为干燥和饱和混凝土在准静态条件下的单轴压缩平均抗压强度，$\dot{\varepsilon}_d$ 和 $\dot{\varepsilon}_s$ 分别为干燥和饱和混凝土在冲击荷载作用下的应变率，$\dot{\varepsilon}_{d0}$ 和 $\dot{\varepsilon}_{s0}$ 分别为干燥和饱和混凝土在准静态条件下的应变率。

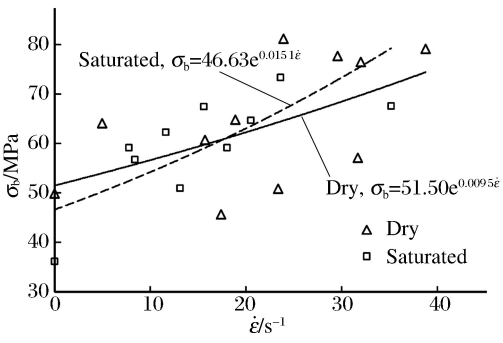

图 7 干燥与饱和混凝土强度与应变率关系曲线

Fig. 7 Strength-strain rate curves of dry and saturated concrete

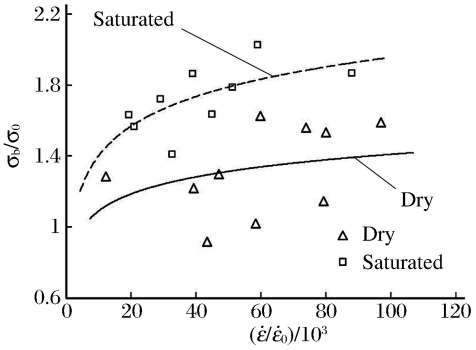

图 8 干燥与饱和混凝土动态强度与应变率拟合

Fig. 8 Strength-strain rate fitting curves of dry and saturated concrete

根据图 7～8 可知，随着应变率的增大，干燥和饱和混凝土强度均有提高的趋势，其中，干燥混凝土动态强度提高了 32.2%，饱和混凝土动态强度提高了 72.4%，增加幅度为干燥混凝土的近 2 倍。这表明：不论干燥或是饱水情况，混凝土均具有明显的应变率效应，并且饱和混凝土比干燥混凝土具有更强的应变率敏感性。

从图 7 可以看出，应变率存在一临界值 $\dot{\varepsilon}_c$（本实验中为(17.74±2) s^{-1}），当应变率 $\dot{\varepsilon}>\dot{\varepsilon}_c$ 时，饱和混凝土的动态强度大于干燥混凝土的的动态强度，即在低应变率条件下，干燥混凝土强度比饱水混凝土大，而在高应变率条件下，则相反。李赞成等[10]在研究 C10 混凝土的动态强度时，也发现在应变率 100～500 s^{-1} 的条件下，饱和混凝土的动态强度比干燥混凝土高 25%～100%。

3 水对混凝土强度影响机理探讨

饱和混凝土在微破裂稳定发展阶段会出现塑性变形和体胀，这为孔隙中的自由水对混凝土的破坏作用提供有利条件。在准静态或应变率较低（小于 $\dot{\varepsilon}_c$）的情况下，由于裂纹拓展的速率较小，自由水有足够的时间沿裂隙扩散，并在一定程度上润滑裂隙接触面，从而促进裂纹拓展，最终使混凝土破坏。根据目前的实验和理论研究可知，混凝土是在裂纹尖端的拉应力作用下破坏的，当应变率较大（大于 $\dot{\varepsilon}_c$）时，裂纹动态扩展的速率很大，混凝土中自由水无法在瞬间扩散到新形成的裂隙中，水的作用反而会阻碍裂纹的扩展，导致饱水混凝土在较高强度下破裂，从而使饱和混凝土的应变率效应更明显。P. Rossi 等[11-12]和 D. Zheng 等[13]认为在动态加载条件下湿混凝土强度提高的原因可由物理学中的 Stefan 效应来解释，即假设在两半径为 r 的平行圆形平板中间有黏性液体存在，当两平板以相对速度 v 分离时，液体会产生一个黏聚力 L 来阻止平板的分离，由 Stefan 效应产生的阻力 L 表示为：

$$L = \frac{3\pi\mu r^4}{2h^3}v \tag{7}$$

式中：μ 为液体的黏度；h 为两圆形平板的间距。动态荷载作用下的应变率就是该模型分离速度的具体表征量。该黏聚力在饱和混凝土内部裂纹表面处产生的应力为：

$$\sigma_c = \frac{3\mu r^2}{2h^3}v \tag{8}$$

D. Zheng 等[13]认为在低加载速率下考虑自由水的作用时，动态增强因子会大于 1.0（不考虑水的作用

时动态增强因子为 1.0)。

图 7 的实验结果和其他实验研究表明[6-7,14]:对混凝土类脆性材料而言,在准静态或低加载速率下,材料在含水状态下的强度低于干燥状态下的强度。这与文献[11-13]中的观点矛盾,主要原因是文献[11-13]中在考虑 Stefan 效应时没有考虑材料的应变率临界值,只有当应变率足够大时,Stefan 效应才能表现出来。

实际上,水对混凝土的影响可以分为 2 部分(如图 9 所示)。

(1) 对混凝土基体的影响。

经充分浸泡后,基体由于水的作用被弱化,饱和基体的弱化效应主要是受与基体结合水的影响,若将弱化因子定义为 D,D 与混凝土的含水量有关,物理意义上与抗压强度存在一定关系:

$$D=\frac{\sigma_{s0}}{\sigma_{d0}} \tag{9}$$

(2) 混凝土空隙或裂隙中的自由水对混凝土基体的力学作用。

饱和混凝土中的 Stefan 效应、楔入效应及自由水毛细作用均是由裂隙中的自由水作用产生的,各效应产生的作用力如图 10 所示。楔入效应主要是由在孔隙裂隙压密时所形成的孔隙水压力 p 产生的,并且与裂纹的扩展速度有关[14-15]。在准静态或应变率较低(见图 10(a))时,自由水能沿新形成的微裂隙继续扩散,孔隙水压力 p 不断减小,直至消失,其影响作用包含在弱化因子中。在较高应变率条件下(见图 10(b)),楔入效应的过程极其短暂,由于裂纹的迅速扩展,因表面张力和毛细作用 p_c 对裂隙表面的吸附,自由水不容易达到缝尖,反而以相对速率 v 向裂隙内运动,产生显著的 Stefan 效应。自由水因黏性产生的 Stefan 效应阻碍裂纹的扩展。

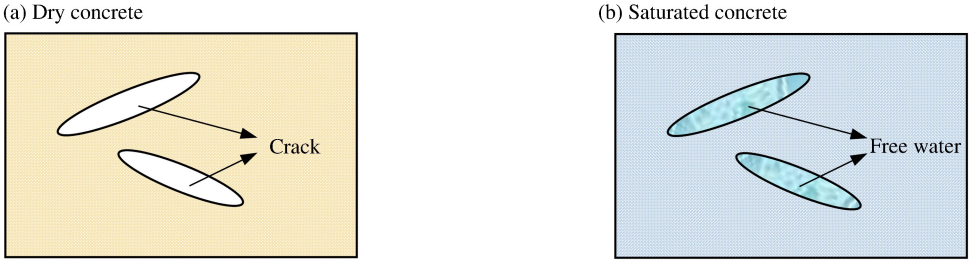

图 9 干燥和饱和混凝土模型示意图

Fig. 9 Schematic model of dry and saturated concrete

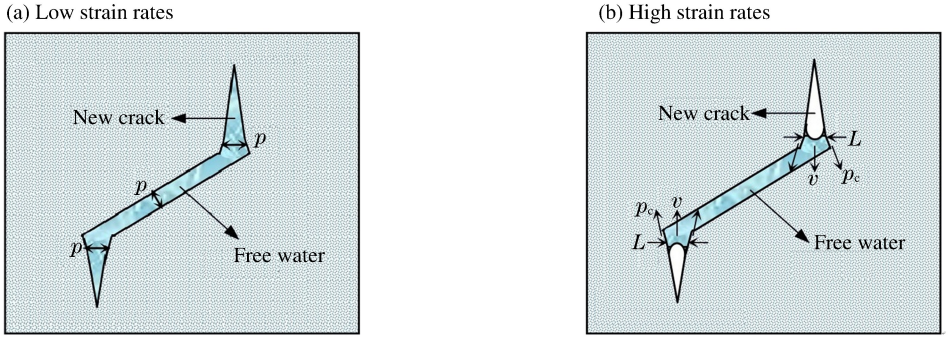

图 10 不同应变率条件下饱和混凝土裂隙中水的作用力示意图

Fig. 10 Schematic force of water in saturated concrete cracks at different strain rates

水的毛细作用 p_c 的计算公式[15]为:

$$p_c=\frac{4\sigma^*}{\rho}\cos\theta \tag{10}$$

式中：σ^* 为界面张力；ρ 为裂纹宽度(毛细管的直径)；θ 为接触角。

由图 10(b)可知，毛细作用 p_c 作用方向平行于劈裂面，对裂纹的扩展基本没有影响，其作用可以忽略。因此不同饱和度下混凝土的强度与应变率的关系为：

$$\sigma_b = f(\dot{\varepsilon}) + [g(\dot{\varepsilon}) - Df(\dot{\varepsilon})]\varphi(w) \tag{11}$$

式中：$f(\dot{\varepsilon})$为干燥状态下的应变率函数，可由实验拟合式(5)求得；$g(\dot{\varepsilon})$为 Stefan 效应 L 关于应变率的函数，在冲击荷载产生的中等应变率条件下，根据式(8)可求得$g(\dot{\varepsilon})=3\mu r^2 K\dot{\varepsilon}/(2h^3)$，$\varphi(w)$是关于混凝土饱和度 w 的函数：

$$\varphi(w)=\begin{cases}0 & w=0\\ aw & 0<w<1\\ 1 & w=1\end{cases} \tag{12}$$

式中：a 为实验参数。在中等应变率条件下，干燥和饱和混凝土的动态强度相等时：

$$f(\dot{\varepsilon})=\frac{1}{D}g(\dot{\varepsilon}) \tag{13}$$

此时得到的应变率即为临界应变率 $\dot{\varepsilon}_c$。当 $\dot{\varepsilon}<\dot{\varepsilon}_c$ 时，$\sigma_s<\sigma_d$。仅当 $\dot{\varepsilon}>\dot{\varepsilon}_c$ 时，饱和混凝土的强度 σ_s 才大于干燥混凝土的强度 σ_d，混凝土中因自由水的黏性产生的 Stefan 效应才能良好地展现出来，因此考虑材料中的 Stefan 效应时，必须考虑应变率这个条件，这也是目前各学者实验研究结果不一致的原因。根据式(11)，只需知道干燥混凝土的强度与应变率的关系就可预测出不同饱和度下的混凝土的强度与应变率的关系。若将该关系进一步量化，还需要更深入的研究和探索。

4 结 论

(1) 在中等应变率条件下，干燥和饱和混凝土的应力应变曲线的形状是基本相同的，动态加载条件下的弹性模量大于静态加载条件下的弹性模量；饱和混凝土的峰值应变比干燥混凝土的峰值应变大，随着应变率的增加两者之间的差值逐渐减小。

(2) 干燥和饱和混凝土均具有明显的应变率效应，随着应变率的提高，饱和混凝土动态强度提高的幅度为干燥混凝土的近两倍，前者具有更强的应变率敏感性。

(3) 存在应变率临界值 $\dot{\varepsilon}_c$：当 $\dot{\varepsilon}<\dot{\varepsilon}_c$ 时，饱和混凝土的强度小于干燥混凝土的的强度；而当 $\dot{\varepsilon}>\dot{\varepsilon}_c$ 时，则相反。因此考虑材料中的 Stefan 效应时，必须考虑应变率。

参考文献：

[1] Bjerkli L, Jensen J, Lenschow R. Strain development and static compressive strength of concrete exposed to water pressure loading[J]. ACI Structural Journal, 1993,90(3):310-315.

[2] Ross C A, Jerome D M, Tedesco J W, et al. Moisture and strain rate effects on concrete strength[J]. ACI Materials Journal, 1996,93(3):293-300.

[3] Rossi P, Van Mier J G M, Boulay C. The dynamic behaviour of concrete: Influence of free water[J]. Materials and Structures, 1992,25(9):509-514.

[4] Rossi P. Influence of cracking in the presence of free water on the mechanical behaviour of concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1991,43(154):53-57.

[5] Mehta P K, Nonteiro P J M. Concrete: Microstructure, properties and materials[M]. Indian Concrete Institute, 1997.

[6] Vu X H, Malecot Y, Daudeville L, et al. Analysis of concrete behavior under high confinemen: Effect of the saturation ratio[J]. International Journal of Solids and Structures, 2009,46(5):1105-1120.

[7] 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]. 水利发电学报，2007,26(1):84-89.
Wang Hai-long, Li Qing-bin. Experiments of the compressive properties of dry and saturated concrete under different loading rates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007,26(1):84-89.

[8] 胡时胜，王道荣. 冲击载荷下混凝土材料的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击，2002,22(3):242-246.

Hu Shi-sheng, Wang Dao-rong. Dynamic constitutive relation of concrete under impact[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(3):242-246.

[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):67-71.
Lü Pei-yin, Song Yu-pu, Hou Jing-peng. Experimental study and failure criterion of compressive concrete under various loading rates with uniaxial lateral confinement[J]. Engineering Mechanics, 2002,19(5):67-71.

[10] 李赞成,张韬,陈磊.湿饱和混凝土抗侵彻性能分析[J].弹箭与制导学报,2009,29(4):106-108.
Li Zan-cheng, Zhang Tao, Chen Lei. The analysis on anti-penetration performance of moist saturated concrete[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009,29(4):106-108.

[11] Rossi P, Van Mier J G M, Toutlemonde F, et al. Effect of loading rate on the strength of concrete subjected to uniaxial tension[J]. Materials and Structures, 1994,27(5):260-264.

[12] Rossi P. Strain rate effects in concrete structures: The LCPC experience[J]. Materials and Structures, 1997(3):54-62.

[13] Zheng D, Li Q. An explanation for rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004,71(16/17):2319-2327.

[14] 周志芳.裂隙介质水动力学原理[M].北京:高等教育出版社,2007.

[15] Yaman I O, Hearn N, et al. Active and non-active porosity in concrete part I: Experimental evidence[J]. Materials and Structures, 2002,35(2):102-109.

Dynamic mechanical properties of dry and saturated concretes and their mechanism

Zhang Yong-liang[1,2,3], Zhu Da-yong[1,3], Li Yong-chi[2],
Yao Hua-yan[1,2,3], Huang Rui-yuan[2], Li Xu-yang[2]

(1. *School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei* 230009, *Anhui, China*;
2. *Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *Anhui, China*;
3. *Anhui Provincial Civil Structural and Material Laboratory, School of civil Engineering, Hefei* 230009, *Anhui, China*)

Abstract: We carried out SHPB tests on dry and saturated concretes using split Hopkinson and they were compared with quasi-static mechanical tests. The results show that the dry and saturated concretes produce an obvious strain rate effect: the ascending part of the stress-strain curve at moderate strain rate is steeper than that of the quasi-static curve; the increasing amplitude of dynamic strength of the saturated concrete, which has a stronger sensitivity to the strain rate, is nearly twice as that of the dry concrete; and there is a threshold of the strain rate, i. e., it is only when the strain rate exceeds this threshold that the dynamic strength of the saturated concrete becomes stronger than that of the dry concrete. Based on the experimental results, the equation showing the relationship between the concrete strength and the strain rate at different saturations is established and given.

Key words: mechanics of explosion; threshold of strain rate; SHPB experiments; concrete; Stefan effect

(责任编辑　王小飞)