

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.02.017



# 水压力环境中混凝土经历循环荷载后的 抗压强度

王乾峰<sup>1,2</sup>, 刘云贺<sup>1</sup>, 彭刚<sup>2</sup>, 邹三兵<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 土木建筑工程学院, 西安 710048; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**研究了水压力环境中混凝土在经历循环荷载后的动态压缩强度,分析了水压力和循环次数对混凝土强度的影响。试验应变速率为  $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$  和  $10^{-2}/s$ , 水压为 0~10 MPa。试验结果表明,在不同水压力下饱和混凝土的强度都随应变速率提高而增加,也随水压力提高呈增加地趋势。在相同水压力下,应变速率越高,混凝土强度提高越显著。饱和混凝土经过循环荷载后,其强度随荷载循环次数的增加呈现出先提高后降低的现象。应变速率越高,混凝土强度最大时对应的荷载循环次数也相应增加。还构建了饱和混凝土强度与应变速率、水压力的关系,其与试验数据吻合较好。进一步引入了管道孔隙模型,并基于承压法的原理和孔隙分布特点,考虑混凝土孔隙的微观结构解释了孔隙水对混凝土强度的作用机理。

**关键词:**混凝土;水压力;循环荷载;应变速率;动态性能;孔隙结构

**中图分类号:** TU528.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)02-0132-08

## Compressive strength of concrete undergone cyclic loads under water pressure environment

Wang Qianfeng<sup>1,2</sup>, Liu Yunhe<sup>1</sup>, Peng Gang<sup>2</sup>, Zou Sanbing<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shanxi, P. R. China;  
2. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

**Abstract:** The dynamic compression strength of concrete which undergone cyclic loading and subjected to water pressure was carried out, and effect of water pressure and cyclic times on strength of concrete was analyzed. Strain rates of tests were  $10^{-5}/s$ ,  $10^{-4}/s$ ,  $10^{-3}/s$  and  $10^{-2}/s$ , and water pressure ranged from 0 to 10 MPa. The results showed that strength of saturated concrete under different water pressure increased with the increasing strain rate, and that also increased with the increasing water pressure. Under the same water pressure, the concrete strength increased more significantly when the strain rate was higher. After cyclic loading, strength of saturated concrete showed the phenomenon of the first increase and then

**收稿日期:** 2016-06-19

**基金项目:** 国家自然科学基金(51279092); 水利部公益性行业科研专项(201501034-03)

**作者简介:** 王乾峰(1982-), 男, 博士生, 主要从事混凝土材料动态力学特性研究, (E-mail) wangqianfeng1208@163.com.

刘云贺(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, (E-mail) liyunhe1968@163.com.

**Received:** 2016-06-19

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51279092); Non-profit Industry Financial Program from MWR (No. 201501034-03).

**Author brief:** Wang Qianfeng (1982-), PhD candidate, main research interest: dynamic characteristics of concrete materials, (E-mail) wangqianfeng1208@163.com.

Liu Yunhe (corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) liyunhe1968@163.com.

decreased as the number of load cycles increased. The higher the strain rate, the greater number of load cycles with maximum concrete strength. The relationships between concrete strength and strain rate, water pressure were established, which was in good agreement with the experimental data. Furthermore, the pipe pore model was introduced, and the mechanism of pore water on the concrete strength was explained and based on the principle of mercury intrusion porosimetry and pore distribution.

**Keywords:** concrete; water pressure; cyclic loads; strain rate; dynamic property; pore structure

混凝土是大坝、港口和桥墩等结构中普遍使用的材料,这些结构经常处于水环境中,在结构表层部分会形成与水压力相等的孔隙水压力。而且,这些结构不仅承受静态荷载的作用,还要遭受地震或是动水压力的冲击。因此,有必要对水环境中的混凝土材料开展动态荷载作用下的试验研究。

许多学者考虑到结构深部承受不可忽略的水压力,开展水环境作用或孔隙水压力作用对混凝土强度影响的研究。李宗利等<sup>[1]</sup>考虑到高压水渗透和孔隙水压力对混凝土的影响,采用高水压力饱和混凝土,结果表明混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量都随孔隙水压力的增加逐渐降低。Bjerkeli等<sup>[2]</sup>在 400、800 m 水压力下对混凝土开展了静态压缩试验,表明水压力作用对混凝土强度和弹性模量没有显著影响。Chen 等<sup>[3]</sup>对水环境中的混凝土进行了静动态加载试验,在 2 MPa 水压力时强度明显降低,但是水压力大于 4 MPa 时其强度高于干燥混凝土的强度。彭刚等<sup>[4]</sup>对混凝土进行了长时间的饱和,结果表明在水环境中混凝土的动态强度提高了。考虑水位周期变化导致水压力往复作用对混凝土的影响,梁辉等<sup>[5]</sup>和刘博文等<sup>[6]</sup>研究了混凝土受循环孔隙水压力时的力学动态性能及损伤破坏特性。这些成果表明水压力因素显著影响混凝土材料的力学性能。另外,结构在遭受致命的破坏荷载之前,通常承担着一部分荷载,结构的荷载历史对混凝土材料的力学性能也有显著影响。肖诗云等<sup>[7-8]</sup>对单调加载历史,以及胡海蛟等<sup>[9]</sup>对循环加载历史后混凝土的力学性能开展了研究,表明荷载历史将导致混凝土的损伤,降低混凝土强度。

荷载历史对混凝土材料的力学性能有显著影响,然而水环境中混凝土受荷载历史后的力学特性还有待深入研究。本文对处于水环境中,经历循环荷载历史后的饱和混凝土进行了静动态力学试验。

## 1 试验设计

### 1.1 试件制备

试验中混凝土试件尺寸为  $\phi 150 \times 300$  mm,采用普通硅酸盐水泥 P. O 42.5,其水泥性能符合普通硅

酸盐水泥标准<sup>[10]</sup>。细骨料是天然河砂,其细度模数为 1.8,属细砂;粗骨料是粒径 5~30 mm 的连续级配天然河卵石;拌合水为饮用自来水。混凝土的水灰比为 0.5,其质量配合比为水:水泥:砂:石子=0.50:1.00:2.11:3.45,拌合物坍落度 30~50 mm。试件采用钢模浇筑成型,在室温下静置 24 h 成型后拆模编号,然后将试件移至标准养护室养护 28 d 后再移至自然环境中。

### 1.2 试验设备

试验所用设备为三峡大学的 10 MN 大型多功能液压伺服静动力三轴仪,该设备可进行常三轴( $\sigma_2 = \sigma_3$ )混凝土动静力加载试验,最大围压值为 30 MPa,最大竖向动、静力负荷分别为 5 000 kN 与 10 000 kN。通过电脑系统可以独立控制围压桶的水压力和轴向的加载速率,可以保证在整个加载水压力稳定,变化幅度小于 0.01 MPa,轴向控制的应变速率恒定,其范围为  $10^{-5} \sim 10^{-2}$  /s,各项指标满足试验要求。试验设备见图 1。



图 1 试验设备图

Fig. 1 Test setup

### 1.3 试验方法

本试验中,混凝土试样与围压水直接接触,采用加压方式使混凝土饱和并达到稳定状态后,再通过三轴仪的加载框架对围压桶顶部的活塞施加轴向荷载,并传导到混凝土试样。试验分为饱和过程和力学加载过程。

1) 混凝土饱和过程。安装混凝土试件后密封围压桶,再将围压桶内充满水并反复开关排水阀排出

空气。之后通过水压力控制系统,使围压桶内的水压力(2、5 和 10 MPa)到达恒定,并维持 16 h 以上,此时通过伺服电机水泵推送到围压桶内的水体积几乎为 0,可以认为混凝土达到饱和。对于 0 MPa 饱和的情况,先施加 2 MPa 的水压力使混凝土内部饱水,待水压力稳定 16 h 后,再降低到 0 MPa,并等待 5 h 以上,使混凝土内部的压力梯度消散,再进行后续的力学加载试验。

2) 力学加载试验。加载过程分为 4 步:以 0.5 MPa/s 的速度<sup>[11]</sup>对混凝土试件施加  $F_0 = 0.4 f_c$  的预加静态荷载,其中  $f_c$  为干燥混凝土的轴抗压强度;按余弦波对试件进行循环等幅加载,循环次数为  $N$  次(0、25、50 和 100),荷载的时程变化过程为:  $F = A \cos(2\pi ft) + f_0$ ,其中,  $F$  为荷载,  $A$  为荷载幅值,  $A = 0.1 f_c$ ,  $f$  为频率,  $f = 0.1$  Hz,  $t$  为加载时间);以 0.5 MPa/s 的速度卸载荷载到 10 kN;对卸载后的混凝土试件,再按设定的应变速率( $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$  和  $10^{-2}/s$ )进行加载至试件完全破坏;加载过程中保证水压力稳定,其变化幅度控制在 0.01 MPa 以内。其中,第 1~3 步采用荷载控制,第 4 步为采用变形控制。循环荷载的时程曲线如图 2 所示。

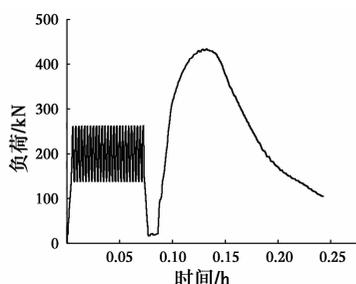


图 2 循环荷载的时程曲线

Fig. 2 Time curve of cyclic loading

在本研究中,分别考虑了水压力变化和循环次数这 2 种因素对饱和混凝土抗压强度的影响。

## 2 试验结果分析

### 2.1 应力-应变全曲线

在试验中,混凝土试件经历了预加载、循环荷载、卸载和单调加载等 4 个过程,部分试件的代表性应力-应变全曲线见图 3 和图 4。

图 3 为混凝土在 2 MPa 水压力下经历 25 次循环后,在不同应变速率下的应力应变全曲线组合。图 4 为混凝土在应变速率  $10^{-2}/s$  时经历 25 次循环后,在不同加载条件下的应力应变全曲线组合。图

3 中应力应变曲线形状基本相似,峰值应力随应变速率的提高而增加;图 4 中应力应变曲线的后半支随水压力的增加而提高,而且峰值应力也随水压力的增加而增长。本文选取整个加载过程中应力应变曲线上的最大应力作为混凝土的抗压强度。

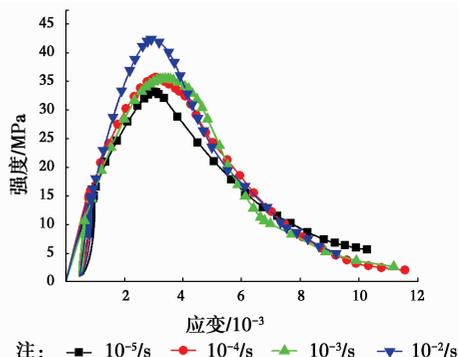


图 3 2 MPa 水压力时混凝土在不同应变速率下的应力应变曲线 ( $N=25$  次)

Fig. 3 Stress-strain curves of concrete under different strain rate at 2 MPa water pressure ( $N=25$  Times)

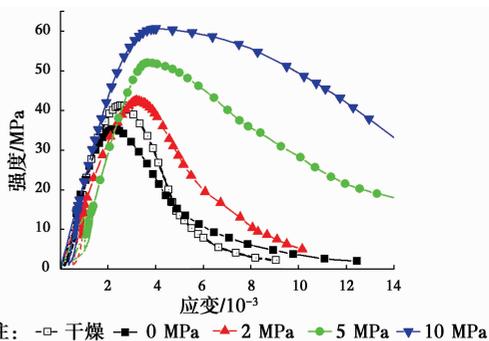


图 4 应变速率  $10^{-2}/s$  时混凝土在不同加载环境下的应力应变曲线 ( $N=25$  次)

Fig. 4 Stress-strain curves of concrete under different loading environment at the strain rate of  $10^{-2}/s$  ( $N=25$  Times)

### 2.2 水压力对混凝土强度的影响

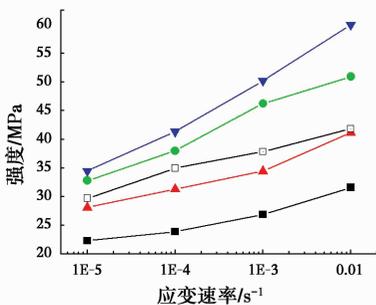
在研究水压力变化对混凝土强度的影响时,循环荷载的循环次数  $N=25$  保持不变,改变水压力大小,水压力分别为 0、2、5 和 10 MPa。为了与 0 MPa 饱和混凝土的强度对比,还进行了一组干燥混凝土在经历循环次数  $N=25$  后,再进行不同应变速率加载的试验。

干燥混凝土和不同水压力下饱和混凝土,在应变速率分别为  $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$  和  $10^{-2}/s$  时,强度与应变速率的变化关系见图 5,强度与水压力的变化规律如图 6 所示。

从图 5 可以看出,干燥混凝土及不同水压力下饱和混凝土强度都随应变速率的提高而增加,水压

力越高,强度随应变速率的增加幅度越明显。在 0、2、5 和 10 MPa 水压力下,混凝土强度在应变速率  $10^{-2}/s$  时比  $10^{-5}/s$  时分别提高了 41.8%、46.7%、55.3% 和 74.0%。各个应变速率下,在 0 和 2 MPa 水饱和和混凝土强度低于干燥混凝土的值,而在 5 和 10 MPa 水压力下饱和混凝土强度高于干燥混凝土的值。

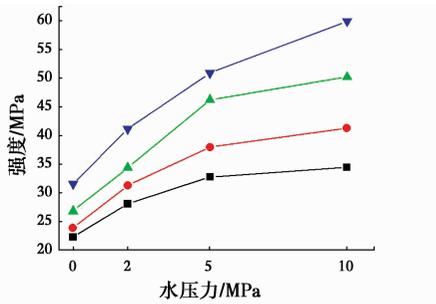
从图 6 可知,混凝土强度随水压力的提高呈增加地趋势。在相同的水压力下,应变速率越高,混凝土强度提高则越显著。水压力从 5 MPa 增加到 10 MPa 时,在应变速率为  $10^{-5}/s$  时仅提高了 5.1%, 而应变速率为  $10^{-2}/s$  时则提高了 17.7%。



注: □-干燥 ■-0 MPa ▲-2 MPa ●-5 MPa ▼-10 MPa

图 5 在不同加载环境下强度与应变速率的关系

Fig. 5 The strength and strain rate under different loading environment



注: ■-  $10^{-5}/s$  ●-  $10^{-4}/s$  ▲-  $10^{-3}/s$  ▼-  $10^{-2}/s$

图 6 强度与水压力的关系

Fig. 6 The strength and water pressure

为了表述应变速率和水压力对混凝土强度的影响,引入了动态增强因子(Dynamic Increase Factor, DIF)和压力增强因子(Pressure Increase Factor, PIF)<sup>[12]</sup>。混凝土强度的动态增强因子(DIF)定义为混凝土强度在各个应变速率下的值与其在应变速率为  $10^{-5}/s$  时的比值,且动态增强因子(DIF)在各自的荷载条件下计算。混凝土强度的压力增强因子(PIF)定义为混凝土强度在各个水压力下的值与其在 0 MPa 水压力时的比值,且压力增强因子(PIF)

在各自的应变速率下计算。

已有的研究表明,干燥或是湿态混凝土的强度与应变速率之间呈线性关系并采用式(1)表示<sup>[13]</sup>。本研究中,水饱和和混凝土在高应变速率时,强度增加更加显著,表现出非线性增长关系。对式(1)修正得到式(2),以描述强度动态增强因子(DIF)与应变速率的非线性关系。

$$DIF(\sigma_d) = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + k \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right) \quad (1)$$

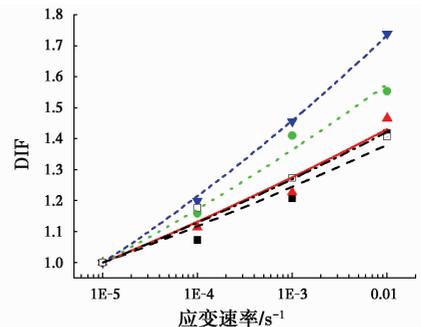
$$DIF(\sigma_d) = \frac{\sigma_d}{\sigma_s} = \left[1 + k \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right)\right]^3 \quad (2)$$

式中: $\sigma_d$  为动态荷载下的强度; $\sigma_s$  为准静态强度; $\dot{\epsilon}_d$  为动态应变速率(试验中  $\dot{\epsilon}_d = 10^{-4}/s, 10^{-3}/s$  和  $10^{-2}/s$ ); $\dot{\epsilon}_s$  为准静态应变速率( $\dot{\epsilon}_s = 10^{-5}/s$ ); $k$  是参数。对干燥混凝土及 4 种水压力下饱和混凝土的试验数据进行拟合,得到的参数  $k$  及其相关系数见表 1。拟合结果见图 7。

表 1 不同水压力下的参数  $k$  值

Table 1 Parameter  $k$  under different water pressures

加载条件	干燥	水压力/MPa			
		0	2	5	10
$k$	0.037 8	0.042 3	0.054 6	0.067 1	0.041 5
$R^2$	0.951 4	0.966 3	0.984 8	0.999 0	0.972 1



注: □ 干燥 -- 干燥的拟合曲线 ■ 0 MPa -- 0 MPa拟合曲线 ▲ 2 MPa -- 2 MPa拟合曲线 ● 5 MPa -- 5 MPa拟合曲线 ▼ 10 MPa -- 10 MPa拟合曲线

图 7 强度与应变速率的拟合结果

Fig. 7 Fitted results between strength and strain rate

混凝土强度的压力增强因子与水压力的关系可以用式(3)表示。

$$PIF = \frac{\sigma_c}{\sigma_0} = 1 + r \cdot \arctan(s \cdot p) \quad (3)$$

式中: $\sigma_c$  为给定水压力下的混凝土强度; $\sigma_0$  为 0 MPa 水压力时的混凝土强度; $p$  为水压力; $r$  和  $s$  为参数。基于试验数据采用式(3)拟合得到参数  $r$  和  $s$  的结果见表 2。拟合结果见图 8。

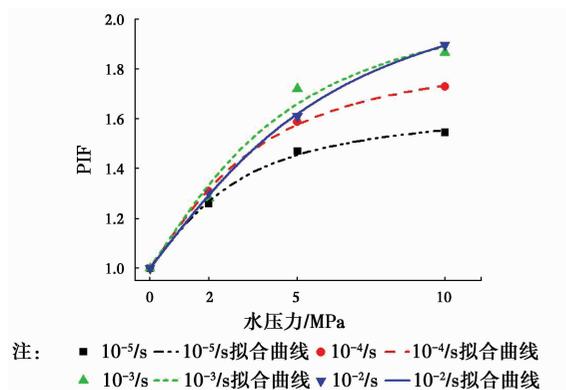


图 8 强度与水压力的拟合结果

Fig. 8 Fitted results between strength and water pressure

表 2 不同应变速率下的参数  $r$  和  $s$  值Table 2 Parameters  $r$  and  $s$  under different strain rates

应变速率/ $s^{-1}$	$r$	$s$	$R^2$
$10^{-5}$	0.425 2	0.367 8	0.996 7
$10^{-4}$	0.588 2	0.299 8	0.999 0
$10^{-3}$	0.762 6	0.235 6	0.977 8
$10^{-2}$	0.834 4	0.184 0	0.999 5

### 2.3 循环次数对混凝土强度的影响

在研究循环次数对混凝土强度的影响时,水压力保持 2 MPa 不变,改变循环次数,循环次数分别为  $N=0, 25, 50$  和 100 次。

饱和混凝土经历不同次数的循环荷载作用后,在应变速率分别为  $10^{-5}/s, 10^{-4}/s, 10^{-3}/s$  和  $10^{-2}/s$  时,其强度与应变速率的变化关系见图 9,强度随循环次数的变化规律如图 10 所示。

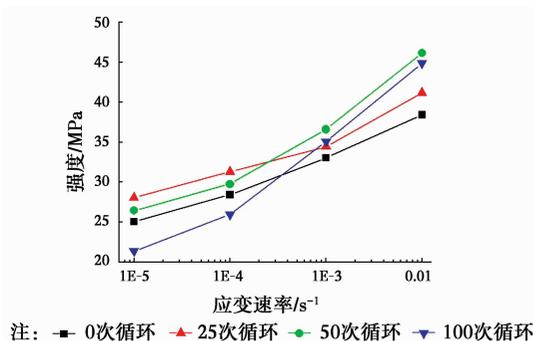


图 9 不同循环次数时强度与应变速率的关系

Fig. 9 The strength and strain rate under different number of cycles

从图 9 可以看出,经过 25~100 次荷载循环后,混凝土强度随应变速度增加而提高。从图 10 可以看出,混凝土强度随荷载循环次数的增加呈现出先

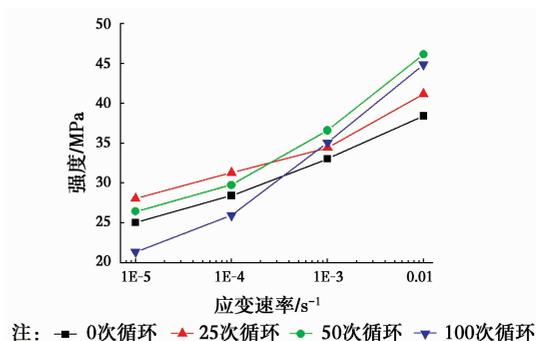


图 10 强度与循环次数的关系

Fig. 10 The strength and number of cycles

提高后降低的现象。应变速率越高,混凝土强度最大时所对应的荷载循环次数也相应增加。在应变速率  $10^{-5}/s$  和  $10^{-4}/s$  时,循环荷载 25 次时的混凝土强度最高,而应变速率  $10^{-3}/s$  和  $10^{-2}/s$  时,混凝土强度最高时经历的循环荷载次数为 50。

### 3 孔隙水对混凝土的力学作用机理分析

在水环境中,混凝土饱和后水将填充孔隙和微裂缝。杜修力等<sup>[14]</sup>、Liu 等<sup>[15]</sup>和 Wu 等<sup>[16]</sup>研究了含水量对混凝土力学性能的影响,但是忽略了混凝土孔隙分布及其结构特征对混凝土力学性能的影响。基于 CT 方法<sup>[17]</sup>的图像表明,混凝土内部存在大量孤立的孔隙,但是这类孔隙结构无法解释水在混凝土内部的流动。混凝土的孔隙<sup>[18]</sup>应包括贯通孔隙,交叉孔隙,盲孔和封闭孔隙,而且孔径分布从小于 0.01~100  $\mu m$  以上<sup>[19]</sup>,可以用连接在混凝土内虚拟结点间的不同直径的管道<sup>[20]</sup>表示。在这个孔隙模型中,水压力越大,水所能渗透的孔隙直径越小<sup>[19, 21]</sup>,即在给定的水压力下,水不能渗透到更小直径的管道孔隙中。

图 11 是混凝土的一个局部细观结构,给出了具有 4 种直径的管道孔隙模型。其中,  $d_0, d_2, d_5$  和  $d_{10}$  分别为大气压力、2、5 和 10 MPa 水压力下可以渗透的管道孔隙直径,  $P_1, P_2$  和  $P_3$  是不同直径的管道孔隙交叉节点。混凝土在 2 MPa 水压力下,水所能渗透的孔隙直径范围分别为  $d_0$  和  $d_2$ ,而不能渗透到更小的孔隙直径  $d_5$  和  $d_{10}$  中。

在水压力环境中完全饱和的混凝土,其内部的孔隙水压力与外部的水压力相同,此时试件内部初始孔隙水压力产生拉应变受到外部水压力作用的抵消,静态强度不受水压力的影响<sup>[2, 22-24]</sup>。在本文试

验中,混凝土在应变速率  $10^{-5}/s$  时的强度随水压力的增加而提高,这表明混凝土在循环荷载之后,其内部的孔隙水在孔隙中的分布发生了变化。

混凝土在施加循环荷载的过程中,骨架对孔隙水的往复冲击作用使水向更小直径的孔隙中渗透,同步混凝土周围的水也将不断向较大直径( $d_0$  和  $d_2$ )的孔隙中渗透。由于孔隙中的水无论是向前推进还是回流,都将需要一定的压力作用<sup>[19]</sup>,因此在荷载循环完成后,在混凝土内部的更小孔隙中( $d_5$  和  $d_{10}$ )必将存留具有一定压力的孔隙水,这部分孔隙水所产生的拉应变不能被外部的水压力所抵消,而需要外部的机械荷载所抵消,这将提高混凝土所表现出的强度。在循环荷载完成后,水在孔隙中的分布见图 12,与孔隙 P1 和 P2 所连接的  $d_5$  和  $d_{10}$  管道孔隙的紧邻部分将充满水。当荷载循环次数增加时,渗透到更小孔径的孔隙水将增加,这能提高混凝土强度。但是,循环次数太多时,渗透到更小孔隙的水所产生的拉应变则引起混凝土的损伤,导致强度降低。因此,混凝土强度出现了循环次数先增加后下降的现象,如图 10 所示。

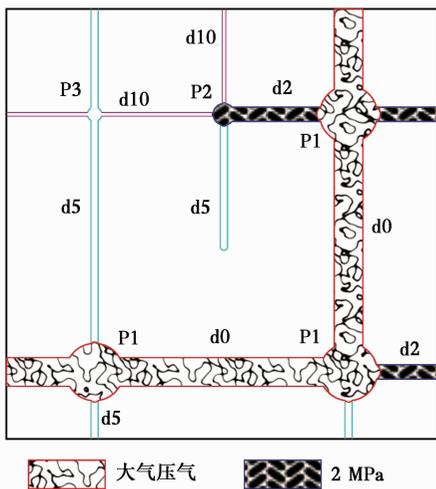


图 11 管道孔隙模型示意图

Fig. 11 Sketch of pipe pore model

由于 Stefan 效应,混凝土的孔隙水在动态荷载作用下将引起显著地粘滞应力  $\sigma_v$ <sup>[25-26]</sup>,这是提高混凝土强度的一个重要因素。其表达式如式(4)所示。

$$\sigma_v = \frac{3\eta V^2}{2\pi h^5} \left( \frac{dh}{dt} \right) \quad (4)$$

式中: $\sigma_v$  为粘滞应力; $V$  为流体的体积; $\eta$  为液体的粘滞系数; $h$  为裂缝间距离; $\frac{dh}{dt}$  为裂缝分开的速度,它与应变速率呈正比<sup>[16]</sup>。对式(4)分析发现,相同体积的孔隙水,孔隙越扁平,高宽比越大,引起地粘

性应力越大<sup>[27]</sup>。混凝土经历循环荷载作用后,水将渗入更小的孔隙,具有更小的尺度,这将引起更加显著的粘滞应力。从宏观力学角度看,这将部分抵消孔隙水压力对混凝土强度的降低。在图 10 中,混凝土都经历了 2 MPa 的水压力饱和,但在高应变速率下,强度最大值所对应的荷载循环次数增加,而且相比低应变速率的情况,循环 100 次时混凝土强度比最大时的降低幅度减小。这是由于孔隙水在循环荷载作用下渗透到了更小的孔隙,在高应变速率下引起了显著地粘滞应力,从而提高了混凝土强度。

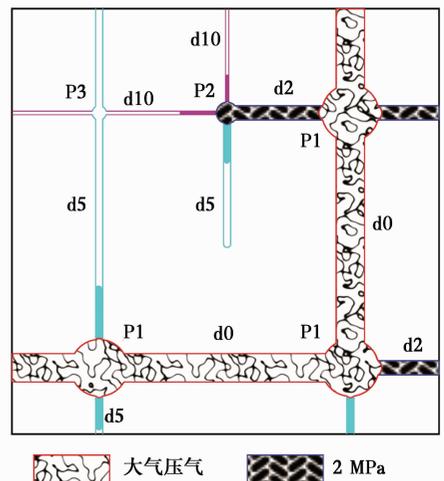


图 12 循环荷载完成后的孔隙水分布

Fig. 12 Pore water distribution after underwent cyclic loads

## 4 结语

通过试验,研究了水压力环境下混凝土在荷载循环后的动态压缩强度,进一步分析了孔隙水对混凝土强度的影响,得出如下结论:

1) 经历不同水压力下饱和混凝土强度都随应变速率的提高而增加;其强度也随水压力的提高呈增长地趋势。在相同的水压力下,应变速率越高,混凝土强度提高则越显著。

2) 经过 25~100 次荷载循环后,混凝土强度随应变速度增加而提高。混凝土强度随荷载循环次数的增长呈现出先提高后降低的现象。应变速率越高,混凝土强度最大时所对应的荷载循环次数也相应增加。

3) 文中提出的描述饱和混凝土强度与应变速率或水压力关系的公式,能很好地与试验数据吻合。

4) 在引入管道孔隙模型的基础上,结合汞压法的基本原理,考虑混凝土孔隙微观尺度的影响,能很好地解释混凝土强度随荷载循环次数变化的力学

机理。

### 参考文献:

- [1] 李宗利,杜守来. 高渗透孔隙水压对混凝土力学性能的影响试验研究[J]. 工程力学, 2011, 28(11): 72-77.  
LI Z L, DU S L. Experimental study on mechanical properties of concrete due to high seepage pore water pressure[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11): 72-77. (in Chinese)
- [2] BJERKELI L, JENSEN J, LENSCHOW R. Strain development and static compressive strength concrete exposed to water pressure loading[J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(3): 310-315.
- [3] CHEN Z, HU Y, LI Q, et al. Behavior of concrete in water subjected to dynamic triaxial compression[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(3): 379-389.
- [4] 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(1): 11-18.  
PENG G, WANG Q F, LIANG C H. Study on dynamic compressive properties of concrete under pore water pressure environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2015(1): 11-18. (in Chinese)
- [5] 梁辉,彭刚,田为,等. 循环孔隙水压下混凝土常规三轴压缩损伤破坏特性分析[J]. 实验力学, 2015, 30(6): 802-809.  
LIANG H, PENG G, TIAN W, et al. Damage property analysis of concrete subjected to conventional tri-axial compression under cyclic pore water pressure [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(6): 802-809. (in Chinese)
- [6] 刘博文,彭刚,邹三兵,等. 循环孔隙水作用下混凝土动态特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(5): 88-94.  
LIU B W, PENG G, ZOU S B, et al. Experimental analysis of dynamic properties of concrete under cyclic pore water effects[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(5): 88-94. (in Chinese)
- [7] 肖诗云,张剑. 荷载历史对混凝土动态受压损伤特性影响试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 943-952.  
XIAO S Y, ZHANG J. Experiment study on effect of load histories on dynamic compressive damage [J]. Shuili Xuebao, 2010, 41(8): 943-952. (in Chinese)
- [8] 肖诗云,张剑. 历经荷载历史混凝土动态受压试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(1): 78-83.  
XIAO S Y, ZHANG J. Experimental research on dynamic compressive behaviors of concrete due to load histories [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(1): 78-83. (in Chinese)
- [9] 胡海蛟,彭刚,谢玖杨,等. 历经循环荷载历史混凝土动态受压试验研究[J]. 混凝土, 2013(1): 51-54.  
HU H J, PENG G, XIE J Y, et al. Experimental study on dynamic compressive behaviors of concrete due to circular loading history [J]. Concrete, 2013(1): 51-54. (in Chinese)
- [10] 通用硅酸盐水泥:GB 175—2007[S]. 2008.  
Common Portland Cement:GB 175-2007[S]. 2008. (in Chinese)
- [11] 普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S]. 2003.  
Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete:GB/T 50081-2002 [S]. 2003. (in Chinese)
- [12] ZENG S, REN X, LI J. Triaxial behavior of concrete subjected to dynamic compression [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 139(9): 1582-1592.
- [13] 闫东明. 混凝土动态力学性能试验与理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
YAN D M. Experimental and theoretical study on the dynamic properties of concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [14] 杜修力,金浏. 饱和混凝土有效模量及有效抗拉强度研究[J]. 水利学报, 2012(6): 667-674.  
DU X L, JIN L. Research on the effective modulus and tensile strength of saturated concrete [J]. Shuili Xuebao, 2012(6): 667-674. (in Chinese)
- [15] LIU B, LV W, LI L, et al. Effect of moisture content on static compressive elasticity modulus of concrete [J]. Construction and Building Materials, 2014, 69: 133-142.
- [16] WU S, CHEN X, ZHOU J. Influence of strain rate and water content on mechanical behavior of dam concrete [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 448-457.
- [17] 田威,党发宁,谢永利. 混凝土拉伸荷载条件下细观破坏过程的 CT 试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(2): 73-78.  
TIAN W, DANG F N, XIE Y L. CT test analysis of meso damage and fracture process of concrete under tensile loading[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(2): 73-78. (in Chinese)
- [18] GIESCHE H. Mercury Porosimetry: A general (practical) overview [J]. Particle and Particle Systems Characterization, 2006, 23(1): 9-19.

- [19] JIAN Z, GUANG Y, BREUGEL V. Characterization of pore structure in cement-based materials using pressurization-depressurization cycling mercury intrusion porosimetry (PDC-MIP) [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(7): 1120-1128.
- [20] VOČKA R, GALLÉ C, DUBOIS M, et al. Mercury intrusion porosimetry and hierarchical structure of cement pastes: Theory and experiment[J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(30): 521-527.
- [21] GAO Z, HU Q. Estimating permeability using median pore-throat radius obtained from mercury intrusion porosimetry [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2013, 10(2): 25014-25020.
- [22] CLAYTON N. Effect of water pressure on concrete strength [C]// *Proceedings of the Second International Conference on Concrete under Severe Conditions*. Tromsø, Norway: 1998: 978-987.
- [23] BUTLER J. The influence of pore pressure upon concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1981, 114(33): 3-17.
- [24] MORLEY C. Theory of pore pressure in reinforced concrete cylinders [J]. *ACI materials journal*, 1979, 76(3/4): 7-45.
- [25] 王海龙,李庆斌. 饱和混凝土静动力抗压强度变化的细观力学机理[J]. *水利学报*, 2006, 37(8): 958-962.  
WANG H L, LI Q B. Micro-mechanism of static and dynamic strengths for saturated concrete [J]. *Shuili Xuebao*, 2006, 37(8): 958-962. (in Chinese)
- [26] ROSSI P. A physical phenomenon which can explain the mechanical behaviour of concrete under high strain rates [J]. *Materials and Structures*, 1991, 24(6): 422-424.
- [27] 李杰,吴建营,陈建兵. *混凝土随机损伤力学* [M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
LI J, WU J Y, CHEN J B. *Stochastic damage mechanics of concrete structures* [M]. Beijing: Chinese Science Press, 2014. (in Chinese)

(编辑 胡玲)