

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.006



# 有压水环境下循环荷载历史对饱和混凝土 动态力学特性的影响

柳琪, 彭刚, 操佩, 谢京辉

(三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心; 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为研究有压水环境中循环荷载历史对混凝土动态力学性能的影响,对历经不同荷载循环次数(0、25、50、100次)的水饱和混凝土试件(在 2 MPa 围压水环境中)进行了不同应变速率( $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}$ /s)下的常规三轴静动态压缩试验,分析了混凝土材料的峰值应力、峰值应变、弹性模量、吸能能力等基本力学参数的变化规律和机理。结果表明:同一加载速率下,水饱和混凝土的峰值应力、弹性模量和吸能能力均随循环次数的增长呈现出先增大后减小的规律,并且峰值应力和吸能能力增减的转折点随着应变速率的提高而向荷载循环次数增大的方向平移,峰值应变整体上呈减小的趋势;相同荷载循环次数后,峰值应力、峰值应变和吸能能力随着加载速率的增大而逐渐增大,并且荷载循环次数越大,率效应越显著,弹性模量随着加载速率的增大而逐渐较小。

**关键词:**循环荷载;饱和混凝土;加载速率;围压

**中图分类号:**TU502.6;TV41 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)06-0046-08

## Influences of cyclic loading history to rate effect of water-saturated concrete under pressurized water environment

Liu Qi, Peng Gang, Cao Pei, Xie Jinghui

(Collaborative Innovation Center for Geological Hazards and Ecological Environment in Three Gorges Area, Hubei Province; College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P. R. China)

**Abstract:** To investigate the influences of cyclic loading history to rate effect of water-saturated concrete under pressurized water environment, the conventional triaxial compression test was carried out in different strain rates ( $10^{-5}$ /s,  $10^{-4}$ /s,  $10^{-3}$ /s,  $10^{-2}$ /s) with the water-saturated concrete samples (in the water environment with 2MPa confining pressure) which had experienced different cyclic loading times (0, 25, 50, 100 times), the change law and mechanism of the basic mechanical parameters such as peak stress, peak strain, elasticity modulus and energy absorption ability were analyzed. It was found that the peak stress, elasticity modulus and energy absorption ability of water-saturated concrete samples all increased at first and then decreased with the increasing times of cyclic loading, and the turning point of peak stress and

**收稿日期:**2017-02-20

**基金项目:**国家自然科学基金(51279092);三峡大学研究生科研创新基金(SDYC2016018)

**作者简介:**柳琪(1993-),女,主要从事混凝土材料动力特性及结构抗震研究,(E-mail)1092905464@qq.com.

彭刚(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)gpeng158@126.com

**Received:**2017-02-20

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51279092); China Three Gorges University Postgraduates' Scientific Research and Innovation Fund (No. SDYC2016018)

**Author brief:** Liu Qi (1993-), main research interests: dynamic behavior of concrete and seismic behavior of structure, (E-mail) 1092905464@qq.com.

Peng Gang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) gpeng158@126.com.

energy absorption ability came close to the direction that cyclic loading times became bigger with strain rate increasing, but the peak strain decreased generally. The peak stress, elasticity modulus and energy absorption ability of the concrete samples which experienced same cyclic loading times all increased with the strain rates increasing and the rate effect was more conspicuous with cyclic loading times increasing, the elasticity modulus showed the change law on the contrary.

**Keywords:** cyclic loading; water-saturated concrete; strain rates; confining pressure

大坝、海洋平台、桥墩等混凝土结构在施工和服役期间会受外界水和循环荷载等因素的影响,导致其力学性能发生变化,进而影响混凝土结构的承载能力、使用年限等。Oshita 等<sup>[1-2]</sup>对荷载作用下混凝土中的孔隙水进行了研究,将孔隙水的质量守恒定律和混凝土固相力的平衡方程相耦合,建立了混凝土中孔隙水的迁移理论模型。Forquin 等<sup>[3]</sup>对比干燥和饱和混凝土的静动态抗压强度,分析了自由水对混凝土强度的影响机制。Park 等<sup>[4]</sup>对混凝土微裂纹中水的迁移和渗透进行了数值仿真模拟。白卫峰等<sup>[5]</sup>将 Terzaghi 有效应力原理应用于饱和混凝土力学特性的研究中,探讨复杂受力环境下孔隙水压力对混凝土抗压强度的影响机制。肖诗云等<sup>[6-8]</sup>对历经荷载历史的混凝土进行了动态受拉和受压试验,探究了历史荷载对混凝土力学特性的影响,并进行了损伤分析。Aslani 等<sup>[9]</sup>基于前人的研究,对历经单调和循环加载的混凝土提出了一种包含包络曲线、卸载曲线、重新加载曲线以及过渡曲线的应力-应变数值模型,该模型能有效地模拟地震区结构的动态响应。综上所述,虽然有关水环境和荷载历史对混凝土动态力学性能的影响均有一定的试验研究,但是这两种因素相互作用下对混凝土动态特性产生影响的研究较少。为此,笔者对历经 0、25、50、100 次机械荷载循环(在 2 MPa 围压水环境中)的水饱和混凝土试件进行了应变速率为  $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}$ /s 的常规三轴静态压缩试验,分析其力学参数的变化规律和机理。

## 1 试验过程

### 1.1 试验设备

试验采用的 10 MN 大型多功能液压伺服静动力三轴仪主要由控制系统、伺服系统控制箱、加载框架系统、液压油泵、围压系统和计算机系统部分组成。系统配有轴压、孔隙水压、围压 3 套独立的 EDC 控制系统,可进行单轴试验、常三轴试验、真三轴试验、剪切试验以及水压条件下(围压、孔隙水压)的混凝土动静力加载试验(主要试验设备见图 1)。

围压桶对混凝土试件可施加的最大围压和最大孔隙水压力值为 30 MPa。加载框架用于对试件进行轴向加载,竖向最大动、静力加载值分别为 5、10 MN,加载系统主要有 3 种控制方式:位移控制、变形控制和负荷控制,最大应变速率响应值为  $10^{-2}$ /s。主伺服油源和辅助伺服油源分别是进行高、低应变速率加载的液压油源系统,是加载试验时的动力源。



图 1 主要试验设备

Fig. 1 Main test equipment

### 1.2 试件制备

试验采用尺寸为  $\Phi 150 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$  圆柱体试件,设计强度为 30 MPa。试件所采用水泥为宜昌三峡水泥有限公司生产的 PO42.5 硅酸盐水泥,粗骨料为 5~30 mm 连续级配的碎石;细骨料是细度模数为 1.8 的连续级配的天然河砂。混凝土试件配合比为水:水泥:砂:石子=0.50:1.00:2.11:3.45(按质量计),水灰比为 0.5,混凝土每立方米材料用量如表 1 所示。

表 1 混凝土每立方米材料用量

kg/m <sup>3</sup>			
粗骨料	细骨料	水	水泥
1 171.8	718.2	170.0	340.0

试件采用钢模成型方式浇筑,为使材料均匀分布,采用先干拌后湿拌的机械搅拌方式,具体做法为:先将称量好的细骨料、粗骨料以及水泥依次倒入搅拌机内,机械搅拌均匀后,再加入预先称量好的自来水进行搅拌,搅拌时间不超过 10 min。试件在模具中于自然环境下静置 24 h 后拆模并编号,将编号后的试件移至标准养护室养护 28 d。

### 1.3 试验过程

1) 试验前准备。将打磨后的试样置于水环境系统的加载装置上,用垫块压住变形计并使其下压 15~20 mm,调正对中,保证小车、垫块、试样和传力柱严格对中,变形计在正常工作区间。水环境系统的围压桶吊装就位后将其箍紧并密封,充水,将整个系统的空气排净后关闭装置上部的排气口(同时也是排水口)。打开操作软件,控制围压桶内水围压升至 2 MPa 后保持 16~17 h 左右,驱动器的位移不再随时间变化则认为混凝土已经饱和。

2) 正式加载。进行应变速率为  $10^{-5} \sim 10^{-4}/s$  的试验时选用辅助伺服油源,进行应变速率为  $10^{-3} \sim 10^{-2}/s$  的试验时选用主伺服油源,加载之前要确认油源开关是否切换。待一切准备就绪后,将水环境系统装置与三轴加载系统框架对中,启动油源加载,以 5 mm/min 恒定速度顶升水环境系统,直至上部传力设备与三轴加载框架传力柱接触,并施加 20 kN 初始荷载。正式加载时先控制三轴仪竖向传力柱以 0.1*f*<sub>c</sub> 的振幅和 0.1 Hz 的频率进行机械荷载循环。结束后竖向压力降至 20 kN,再控制三轴系统以试验所需的应变速率进行压缩直至试样失去承载能力。正式加载全过程控制水环境系统维持水围压为 2 MPa 不变。

3) 卸载及后续处理。加载完成后,将水环境系统降至初始位置,关闭油源系统,用计算机控制系统将水环境设备中的压力降至自来水压力,并打开出水阀,用辅助排水设备将水环境系统中的水排净。拆开围压桶并用吊装设备将围压桶吊起,对试验后试样作后续处理。

## 2 基本力学性能分析

为研究水环境中混凝土在循环荷载作用下的力学特性,对水饱和混凝土试样(在 2 MPa 围压水环境中)进行 0、25、50、100 次荷载循环后,进行应变速率为  $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}/s$  的常规三轴静动态压缩试验。试验共 16 种工况,考虑到混凝土试件的离散性,每种工况至少 3 个试件以保证每个力学参数有 3 个有效数据,并取其平均值进行分析。图 2 所

示应力-应变全曲线为每种工况下 3 次有效试验中较好的试验曲线。

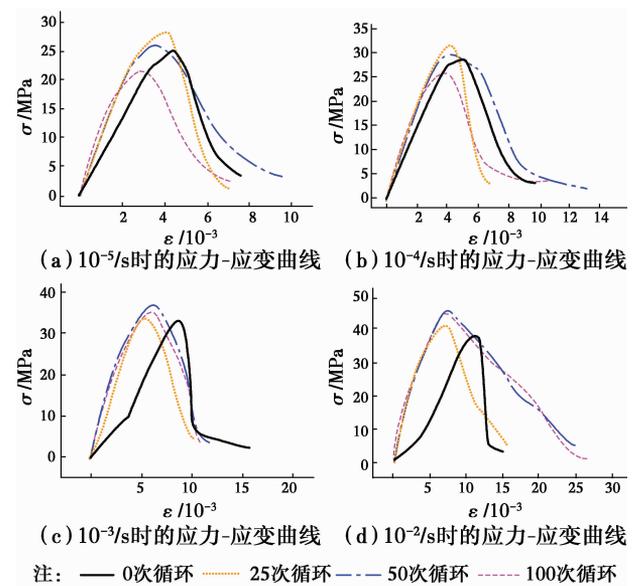


图 2 应力-应变全曲线

Fig. 2 Stress-strain curves

### 2.1 峰值应力的动态特性

水饱和混凝土在 2 MPa 水围压环境中历经不同次数荷载循环后,在应变速率分别为  $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}/s$  下的峰值应力见表 2,变化趋势见图 3、图 4。

表 2 混凝土峰值应力值

Table 2 Peak stress of concrete

循环次数	峰值应力值/MPa			
	$10^{-5}/s$	$10^{-4}/s$	$10^{-3}/s$	$10^{-2}/s$
0	25.06	28.41	33.051	38.42
25	28.08	31.3	34.44	41.18
50	26.42	29.75	36.59	46.16
100	21.35	25.95	35.08	44.86

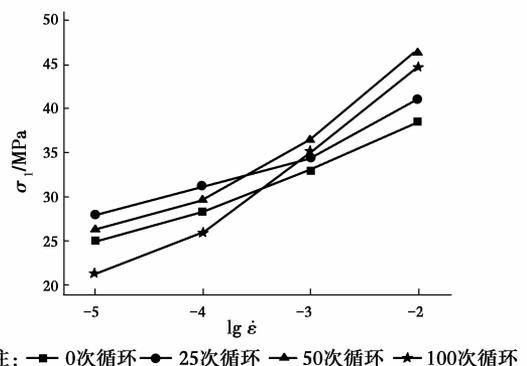


图 3 峰值应力与应变速率的关系

Fig. 3 Relationship between peak stress and strain rate

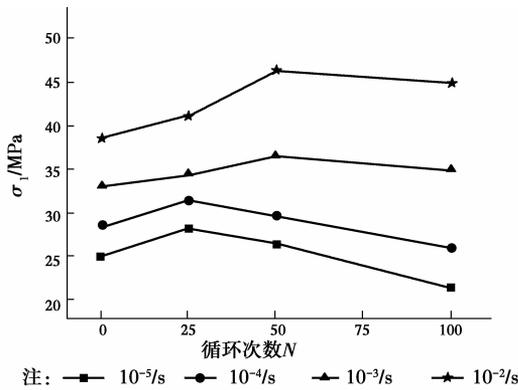


图4 峰值应力与荷载循环次数的关系

Fig. 4 Relationship between peak stress and loading cycles

由表2和图3可见:

1) 历经不同次数荷载循环后混凝土材料的峰值应力随着应变速率的增大而逐渐增长。其原因为:应变速率影响破坏形式。静态加载的情况下,混凝土的损伤发展遵循“最小吸能原理”,即最先发生在最容易被破坏的地方,初始微裂缝和孔隙由于应力集中而不断扩展,新的裂缝不断产生,直至裂缝贯穿截面而失去承载能力。动态加载时,应变速率越高,混凝土越容易沿粗骨料局部应力集中处发生破坏,导致最终破坏时需要的能量更多,峰值应力也增大。水的存在影响裂缝扩展。微裂缝中水的 Stefan 效应能够一定程度地阻止裂缝扩展,而且这种阻力与加载速率成正比<sup>[10]</sup>,因此,加载速率越高,Stefan 效应越强。

2) 荷载循环次数影响混凝土率效应。分析25、50、100次荷载循环对应的曲线可知峰值应力的增长趋势因循环次数的增多而更加显著,即荷载循环次数越多,率效应越明显;而0次荷载循环对应曲线的增长趋势较25次的略为明显。原因是2 MPa的围压水环境本身对混凝土率敏感性就有增强作用<sup>[11-13]</sup>,而混凝土在历经25、50、100次荷载循环后内部的孔隙率和微结构发生了变化,并且由此产生的水压力使得新发展的裂隙迅速被水充满,引起含水率增大,因而加载时随着应变速率的提高,Stefan效应对峰值应力的提高程度更加明显;而25次荷载循环后试件孔隙率较0次的小,含水率较小,加载时Stefan效应稍弱,因此,率效应比0次荷载循环时稍弱。

不同应变速率下试件的破坏形态均为共轭斜面剪切破坏(如图5所示)。出现这种破坏形态的原因是:

1) 混凝土试样在加载过程中产生纵向变形,泊

松效应使其产生横向膨胀变形,进而使混凝土试样内部产生横向拉应力。

2) 试验过程中试样与传力板之间没有减摩措施,两者刚度的差异导致侧向变形不一致,这使得传力板对试件产生向里的径向摩擦力,约束其横向变形,间接使混凝土试件上下顶面局部处于三轴受力状态,因此,试样失去承载力时,表现为上下两个锥形破坏面。

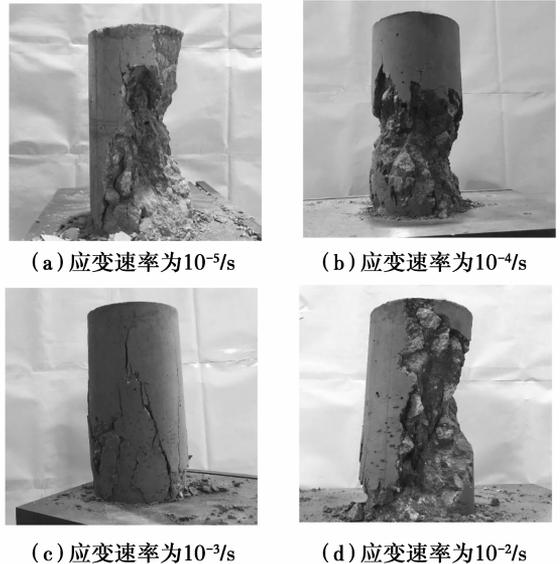


图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure form of specimen

由表2和图4可得,同一应变速率下混凝土材料的峰值应力随着荷载循环次数的增大呈现出先增大后减小的趋势,并且峰值应力增减的转折点随着应变速率的提高而向荷载循环次数增大的方向平移,即图中 $10^{-5}/s$ 和 $10^{-4}/s$ 加载速率下变化曲线的峰值点对应25次,而 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$ 应变速率下变化曲线的峰值点对应50次。出现这种结果的原因是:当荷载循环次数较少时,混凝土中一部分初始裂隙被压缩或压实,同时产生部分新的毛细裂缝,但试件整体的孔隙率减小,黏性效应减弱,“楔入”效应<sup>[14-15]</sup>也较弱,此时初始裂隙被压缩或压实、“楔入”效应减弱带来的强度提高作用高于黏性效应减弱带来的强度降低作用,因此,整体上混凝土的强度提高了;当荷载循环次数超过一定值之后,之前被压实的裂隙逐渐扩展形成较多的细观裂纹,新的裂隙也不断产生和扩展,试件整体的孔隙率增大,加载时黏性效应增强,“楔入”效应也增强,但是整体上荷载循环和“楔入”效应对混凝土的劣化作用高于Stefan效应对混凝土强度的提高作用,因此,混凝土的强度有

所降低。关于强度增减转折点的平移可以解释为：荷载循环次数影响了混凝土的率敏感性。50 次循环后比 25 次循环后的孔隙率大，黏性效应更强，当加载速率较低时，裂缝更容易沿着初始裂缝扩展直至贯通，黏性效应的增强作用明显不及荷载循环的劣化作用，因而，强度增减转折点靠近 25 次循环；当加载速率较高时，裂缝更容易直接贯穿粗骨料直至试件被破坏，因而，强度增减的转折点靠近 50 次循环。

## 2.2 峰值应变的动态特性

水饱和混凝土在 2 MPa 水围压环境中历经不同次数荷载循环后，进行应变速率分别为  $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}$ /s 的试验，峰值应变见表 3，变化趋势分别见图 6、图 7。

表 3 混凝土的峰值应变值  
Table 3 Peak strain of concrete

循环次数	峰值应变/ $10^{-3}$			
	$10^{-5}$ /s	$10^{-4}$ /s	$10^{-3}$ /s	$10^{-2}$ /s
0	4.35	4.97	8.72	11.13
25	4.01	4.18	5.29	7.01
50	3.61	4.32	5.99	7.36
100	2.84	3.89	5.86	7.25

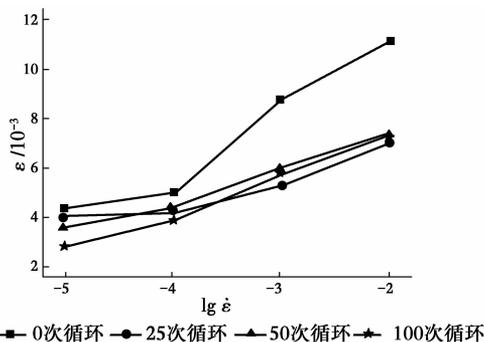


图 6 峰值应变与应变速率的关系

Fig. 6 Relationship between peak strain and strain rate

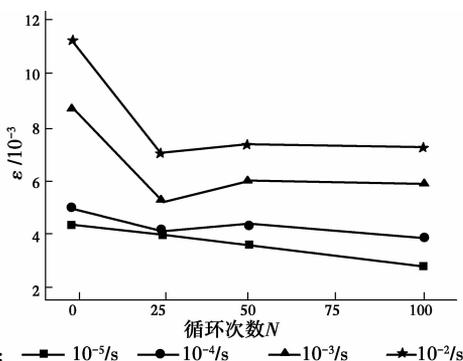


图 7 峰值应变与荷载循环次数的关系

Fig. 7 Relationship between peak strain and loading cycles

由表 3 和图 6 可知，经过 0 次、25 次、50 次、100 次荷载循环后，峰值应变随应变速率的升高呈渐增加的规律。峰值应变随荷载循环次数的增多整体上呈减小的趋势。其原因为：由于荷载循环作用的存在并随着荷载循环次数的增加，在混凝土在循环过程中有一部分微孔隙被压实，同时也会产生新的裂缝。前期循环，减小了混凝土的残余变形，当循环逐渐增大时混凝土内部裂缝增多，最终导致变形增大。

## 2.3 弹性模量的动态特性

混凝土的弹性模量是其重要力学特征，一般取相当于结构使用阶段工作应力时  $\sigma = (0.4 \sim 0.5) f_c$  的平均割线模量来标定混凝土的弹性模量值<sup>[16]</sup>，鉴于大部分试件在破坏之前经历过荷载循环，应力、应变数据显示当应力小于  $0.35 f_c$  时试件处于压密阶段，应力大小为  $(0.35 \sim 0.45) f_c$  时试件基本处于弹性阶段（包括 0 次荷载循环的试件）。因此，混凝土弹性模量采用式(1)计算得到，弹性模量具体数值见表 4，弹性模量与加载速度、荷载循环次数之间的变化趋势见图 8、图 9。

$$E = (\sigma_{0.45} - \sigma_{0.35}) / (\epsilon_{0.45} - \epsilon_{0.35}) \quad (1)$$

式中： $E$  为弹性模量； $\sigma_{0.35}$ 、 $\sigma_{0.45}$  分别表示峰值应力的 35%、45%； $\epsilon_{0.35}$ 、 $\epsilon_{0.45}$  分别为  $\sigma_{0.35}$ 、 $\sigma_{0.45}$  所对应的峰值应变。

表 4 混凝土的弹性模量

Table 4 Elasticity modulus of concrete

循环次数	混凝土的弹性模量/GPa			
	$10^{-5}$ /s	$10^{-4}$ /s	$10^{-3}$ /s	$10^{-2}$ /s
0	6.71	7.31	5.37	4.74
25	10.93	9.27	8.13	7.22
50	11.10	10.37	8.04	7.45
100	8.94	9.74	7.20	7.33

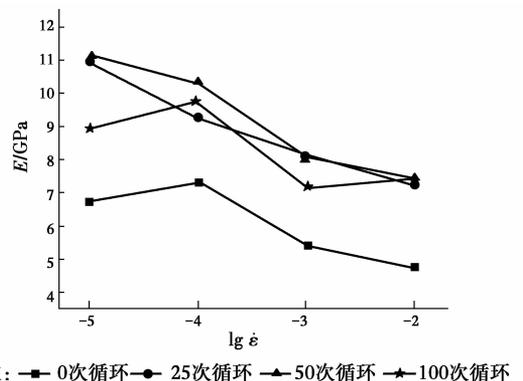


图 8 弹性模量与应变速率的关系

Fig. 8 Relationship between elasticity modulus and strain rate

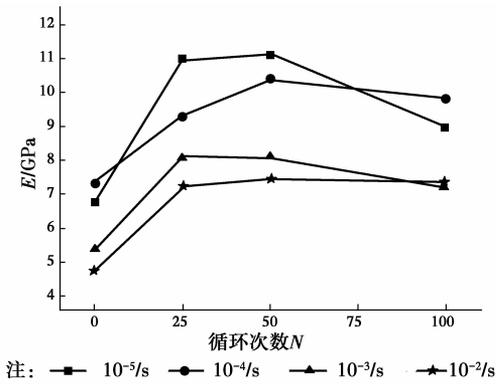


图 9 弹性模量与荷载循环次数关系

Fig. 9 Relationship between elasticity modulus and loading cycles

分析表 4 和图 8 可知,随着应变速率的增大,弹性模量呈逐渐减小的趋势;分析图 9 可知,随着荷载循环次数的增大,弹性模量呈现出阶段性变化规律,即先开始变大后变小。这是因为荷载循环对混凝土有压实作用,但是高次循环后劣化作用大于压实作用。其变化规律用式(2)进行拟合,得到归一化拟合曲线见图 10,拟合参数见表 5。

$$E/E_0 = 1 + a_1 N + a_2 N^2 \quad (2)$$

式中: $E_0$  为未经过荷载循环的弹性模量; $N$  为荷载循环次数; $a_1$ 、 $a_2$  材料的特征系数。

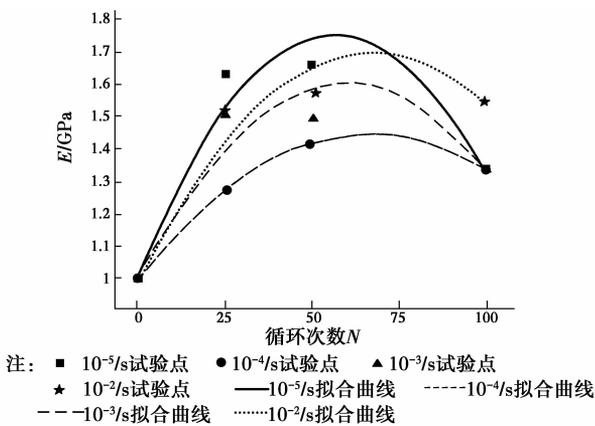


图 10 弹性模量与荷载循环次数的拟合图

Fig. 10 Fitting relationship between elasticity modulus and loading cycles

表 5 弹性模量拟合参数表

Table 5 Fitting parameters for elasticity modulus

应变速率	$a_1/10^{-2}$	$a_2/10^{-4}$	$R^2$
$10^{-5}/s$	2.64	-2.33	0.89
$10^{-4}/s$	1.33	-1.00	0.99
$10^{-3}/s$	2.01	-1.68	0.81
$10^{-2}/s$	2.06	-1.53	0.88

由表 5 可知混凝土弹性模量与荷载循环次数之间拟合关系的相关系数在 0.81 以上,式(2)能够较好地反映两者之间的关系。

### 2.4 吸能能力分析

混凝土吸能能力是表征其力学特征的重要参数,直接体现出混凝土内部微裂隙产生、扩展甚至发生损坏时所需的能量。所得的吸能能力用峰前的全曲线与坐标横轴所围成的区域面积来代表,其表达式见式(3),吸能能力数据见表 6,规律图见图 11、图 12。

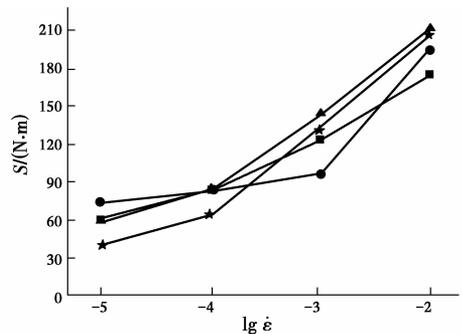
$$S = UV = V \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma d\epsilon \quad (3)$$

式中: $S$  为混凝土的吸能能力; $U$  为单位体积内的能量密度; $\epsilon$  为应变; $\epsilon_{\max}$  为峰值应变; $\sigma$  为应力; $V$  为试样的体积。

表 6 混凝土吸能值

Table 6 Energy absorption value of concrete

循环次数	混凝土吸能/(N·m)			
	$10^{-5}/s$	$10^{-4}/s$	$10^{-3}/s$	$10^{-2}/s$
0	61.40	83.38	123.13	175.89
25	74.32	82.20	96.02	195.28
50	58.92	84.03	143.77	210.69
100	39.82	63.45	132.34	206.33



注: ■ 0次循环 ● 25次循环 ▲ 50次循环 ★ 100次循环

图 11 吸能能力与应变速率的关系

Fig. 11 Relationship between energy absorption capacity and strain rate

众多学者已经对混凝土的吸能能力进行了相当透彻的研究,并且得出比较统一的结论,混凝土的吸能能力随着加载速度的增大而增大<sup>[17-19]</sup>,图 11 所呈现的变化规律与该结论一致。加载速率越高,混凝土内部 Stefan 效应对裂缝扩展的阻止力度越强,并且破坏时裂缝更容易在粗骨料应力集中处产生,因此,吸能能力随加载速率的增加而增加。

由图 12 可知,在同一加载速度下,随着荷载循环次数的增多,吸能能力总体上呈先增大后减小的趋势,并且随着加载速率的提高,吸能能力增减的转

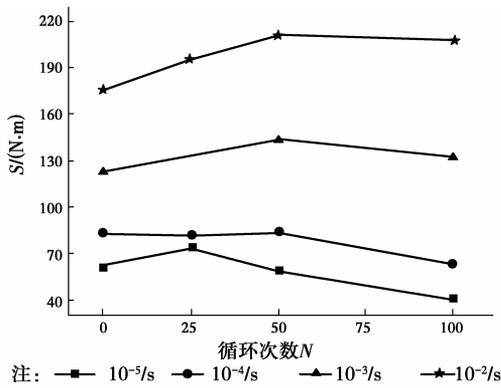


图 12 吸能能力与循环次数的关系

Fig. 12 Relationship between energy absorption capacity and loading cycles

折点向荷载循环次数增大的方向平移。正好印证了不同加载速率下应力随循环次数的变化规律,原因同循环次数对峰值应力的影响。

对试验数据进行对比分析,随着加载速度的升高,混凝土吸能能力的增幅与加载速度的对数呈线性增长的变化规律,用式(4)进行拟合,拟合曲线见图 13,相关系数见表 7。

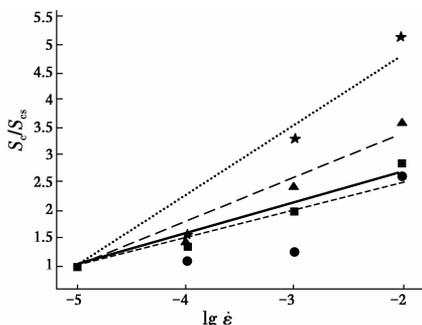
$$S_c/S_{cs} = 1 + b \lg(\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{cs}) \quad (4)$$

式中:  $S_c$  为混凝土动态加载时的吸能能力;  $S_{cs}$  为混凝土静态加载时的吸能能力;  $b$  为剖析试验数据获得的材料相关系数;  $\dot{\epsilon}_c$  为当前加载速度;  $\dot{\epsilon}_{cs}$  为拟静态加载速度,取  $10^{-5}/s$ 。

表 7 吸能能力增长幅度拟合系数表

Table 7 Fitting parameters for energy absorption amplification

循环次数	$b$	$R^2$
0	0.569	0.957
25	0.499	0.897
50	0.788	0.951
100	1.270	0.940



注: ■ 0次试验点 — 0次拟合曲线 ● 25次试验点 ---- 25次拟合曲线  
▲ 50次试验点 - - - 50次拟合曲线 ★ 100次试验点 ..... 100次拟合曲线

图 13 吸能增加值与应变速率的拟合图

Fig. 13 fitting relationship between energy absorption capacity and strain rate

由图 13 可知,混凝土的吸能能力随着加载速率的增大而增大;经过 25 次荷载循环的吸能能力与加载速率的拟合曲线的斜率比 0 次略低;经过 25、50、100 次荷载循环后,斜率随着循环次数的增加逐渐增加,这说明荷载循环次数影响了混凝土吸能能力的率敏感性。表 7 所示吸能能力增加值与加载速率拟合关系的相关系数在 0.89 以上,因此,式(4)能够较好地反映两者之间的关系。

### 3 结论

对水饱和混凝土试样(2 MPa 围压水环境中)作用(0、25、50、100 次)的机械荷载循环后,进行应变速率为  $10^{-5}$ 、 $10^{-4}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-2}/s$  的常规三轴压缩试验,得到如下结论:

1) 应变速率相同时,水饱和混凝土的峰值应力、弹性模量和吸能能力均随循环次数的增长呈现出先增大后减小的规律,并且峰值应力和吸能能力增减的转折点随着应变速率的提高而向荷载循环次数增大的方向平移,峰值应变整体上呈减小的趋势。

2) 荷载循环次数相同时,峰值应力、峰值应变和吸能能力随着加载速率的增大而逐渐增大,弹性模量随着加载速率的增大而逐渐较小。

3) 荷载循环次数越多,水饱和混凝土的率效应越明显。

### 参考文献:

- [1] OSHITA H, TANABE T A. Water migration phenomenon model in cracked concrete I: Formulation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126: 539-543.
- [2] OSHITA H, TANABE T A. Water migration phenomenon model in cracked concrete II: Calibration [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126: 544-549.
- [3] FORQUIN P, SAFA K, GARY G. Influence of free water on the quasi-static and dynamic strength of concrete in confined compression tests [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(2): 321-333.
- [4] PARK S, KWON B S. Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1): 597-604.
- [5] 白卫峰,解伟,管俊峰,等. 复杂应力状态下孔隙水压力对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(1): 24-30.

BAI W F, XIE W, GUAN J F, et al. Influence of

- water pressure on compressive strength of concrete under complicated stress states [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(1): 24-30. (in Chinese)
- [6] 肖诗云, 田子坤. 历经荷载历史混凝土动态受拉损伤试验研究[J]. *工程力学*, 2010, 27(1): 123-128.  
XIAO S Y, TIAN Z K. Experiment on dynamic tensile damage behavior of concrete after undergoing loading history [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(1): 123-128. (in Chinese)
- [7] 肖诗云, 张剑. 历经荷载历史混凝土动态受压试验研究[J]. *工程力学*, 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)
- [8] 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 behaviors of concrete [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(8): 943-952. (in Chinese)
- [9] ASLANI F, JOWKARMEIMANDI R. Stress-strain model for concrete under cyclic loading [J]. *Magazine of Concrete Research*, 2012, 64(8): 673-685.
- [10] 黄桥平. 基于 Stefan 效应的混凝土随机细观黏性损伤模型[J]. *结构工程师*, 2013(4): 31-37.  
HUANG Q P. Stochastic micro-viscous damage model for concrete based on the stefan effect [J]. *Structural Engineer*, 2013(4): 31-37. (in Chinese)
- [11] 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, 48(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, 48(1): 11-18. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 张永亮, 朱大勇. 干燥和饱和混凝土动态力学特性及其机理[J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(6): 864-870.  
ZHANG Y L, ZHU D Y. Dynamic mechanical properties of dry and saturated concretes and their mechanism [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(6): 864-870. (in Chinese)
- [14] 王海龙, 李庆斌. 孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响[J]. *工程力学*, 2006, 23(10): 141-144.  
WANG H L, LI Q B. Effect of pore water on the compressive strength of wet concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2006, 23(10): 141-144. (in Chinese)
- [15] CADONI E, LABIBES K, ALBERTINI C, et al. Strain-rate effect on the tensile behavior of concrete at different relative humidity levels [J]. *Materials and Structures*, 2001, 34(1): 21.
- [16] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 17.
- [17] 肖诗云, 林皋, 王哲, 等. 应变率对混凝土抗拉特性影响[J]. *大连理工大学学报*, 2001, 41(6): 721-725.  
XIAO S Y, LIN G, WANG Z, et al. Effects of strain rate on dynamic behavior of concrete in tension [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2001, 41(6): 721-725. (in Chinese)
- [18] 田子坤. 混凝土单轴动态受拉损伤试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
TIAN Z K. Experimental study on the uniaxial dynamic tensile damage of concrete [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [19] 邹笃建, 刘铁军, 滕军, 等. 混凝土柱单轴动态抗压特性的应变率效应研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(2): 145-150.  
ZOU D J, LIU T J, TENG J, et al. Strain rate effect on uniaxial compressive behavior of concrete columns [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(2): 145-150. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)