

文章编号:1001-4888(2015)06-0802-08

循环孔隙水压下混凝土常规三轴 压缩损伤破坏特性分析^{*}

梁辉^{1,2}, 彭刚^{1,2}, 田为^{1,2}, 黄仕超^{1,2}

(1. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北宜昌 443002)

摘要: 本文进行了孔隙水压不同循环次数(0次, 10次, 50次, 100次和200次)以及不同应变速率下($10^{-5}/s$, $10^{-4}/s$, $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$)混凝土常规三轴压缩试验, 分析了混凝土峰值应变的变化规律、应力—应变曲线及损伤特性。结果表明: 相同循环次数孔隙水压下, 峰值应变随应变速率增加, 整体呈现出增加的趋势; 而相同应变速率下, 峰值应变随孔隙水压循环次数的变化规律并不明显; 在中低应变速率($10^{-5} \sim 10^{-3}/s$)下, 混凝土的损伤变化受孔隙水压循环次数影响较大; 当循环次数达到200次时, 孔隙水压作用对混凝土产生较大的损伤。通过对循环孔隙水作用下混凝土动态损伤破坏机理的分析可知: 混凝土的破坏过程实际上是内部裂纹不断形成、扩展、贯通, 材料损伤不断产生、累积的过程; 当损伤达到一定程度, 混凝土发生宏观破坏, 失去承载力。

关键词: 常规三轴压缩试验; 循环次数; 孔隙水压; 损伤破坏

中图分类号: TV4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-14-203

0 引言

大坝、桥梁墩台等混凝土结构在施工或服役期, 往往要受到水压的持续作用和其他荷载的共同影响, 使得整个结构的功能丧失, 甚至出现破坏。目前, 对于大气自然环境中混凝土静动态研究已取得丰硕成果, 而复杂环境中的混凝土动态性能研究仅有少量的研究成果。

Bjerkei 等^[1]进行了水压力作用下混凝土的强度及变形规律的试验研究, 得到混凝土试件在水压力作用下, 混凝土内部产生孔隙水压力的大小与渗透系数和吸附水的能力相关。Z. F. S. CHEN 等^[2]进行了不同混凝土内部湿度和围压水作用方式下混凝土的压缩试验, 结果表明: 在密封和不密封两种条件下, 干燥和饱和混凝土的抗压强度均受到围压的影响, 但饱和混凝土受围压影响较小。H. Oshita and Tanabe^[3]研究发现混凝土的孔隙水压力最大值发生在平均应力最大值所对应的应变处。王春来^[4]通过对不同围压下钢纤维混凝土的压缩试验研究发现: 随着围压的增大, 混凝土峰值应力、峰值应变均有不同程度的提高。闫东明等^[5]进行了立方体混凝土试件在不同围压、不同应变速率下的压缩试验, 结果表明: 当围压较低时, 应变速率对混凝土强度影响占主导地位; 当围压较高时, 应变速率对混凝土强度影响减弱, 尤其是当围压值超过了混凝土的单轴抗压强度时, 其对混凝土强度影响可以忽略。李宗利等^[6]对高渗透孔隙水压下混凝土的力学性能进行了研究, 得到混凝土的抗压强度、劈拉强度和弹性模量逐渐

^{*} 收稿日期: 2014-10-16; 修回日期: 2015-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279092); 三峡大学研究生科研创新基金项目(2014CX022); 2014年湖北省协同创新中心研究生自主探索基金项目; 三峡大学2015硕士学位论文培优基金(2015PY017)

通讯作者: 彭刚(1963—), 男, 教授、博士生导师。主要从事混凝土材料动力性能与结构抗震方面研究。Email: gpeng158@126.com

降低,损失率逐渐增大的结论。李杰^[7,8]在经典损伤定义基础上,建立了混凝土受拉随机损伤本构模型,通过试验初步确定了模型特征参数,为研究混凝土在复杂受力条件下的随机损伤本构模型打下了基础。

综上所述,围压、循环孔隙水压对混凝土各方面性能有着较大的影响。而对于大坝混凝土结构来说,会受到孔隙水循环作用使得混凝土材料性能劣化,从而对坝体稳定性构成严重的危害。基于此,进行不同孔隙水压循环次数作用后的混凝土常三轴动态压缩试验研究,并对其动态特性进行分析显得非常有必要。

1 试验

1.1 试验设备

本次试验主要进行历经不同次数的孔隙水压循环作用下和不同围压下的混凝土动态常三轴试验,加载速率为 $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$ 。试验所用设备为三峡大学的 10MN 大型多功能液压伺服静动力三轴仪,它主要由控制系统、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这几部分组成。主要试验加载设备,见图 1 和图 2。加载方式主要有三种:位移控制、变形控制和负荷控制,最大应变速率响应值为 $10^{-2}/s$ 。通过电脑系统全程控制,利用加压阀系统给围压桶加水 and 加压,进行围压及孔隙水压试验。



图 1 围压桶

Fig. 1 Confining pressure barrel



图 2 加载框架

Fig. 2 Load Frame

1.2 试件制备

本次试验采用尺寸为 $\phi 300 \times 600\text{mm}$ 的圆柱体混凝土试件,其设计强度为 C30。水泥采用宜昌花林水泥有限公司生产的强度等级为 42.5 的普通硅酸盐水泥,经检验其 3d、28d 抗压、抗折强度等均满足规范要求;试验拌合用水采用饮用水。粗骨料为 5~40mm 连续级配的碎石,属于二级配;细骨料为河砂,连续级配,经筛分试验测定后得其细度模数为 2.3,混凝土试件配合比为水泥:水:砂子:石子 = 1.00 : 0.50 : 2.28 : 3.72,采用的各材料具体用量,见表 1。

表 1 混凝土每立方米材料用量(kg)

Tab. 1 Amount of material of concrete per cubic meter(kg)

粗骨料	细骨料	水	水泥
1190.0	730.0	160.0	320.0

为了减小相同批次混凝土之间的差异性,本文试件采用钢模浇筑,为了使骨料与水泥均匀性分布,采用了先干拌后湿拌的机械搅拌方式,然后在自然条件下养护 90d。最后采用打磨机对试件进行打磨,使其表面光滑。

1.3 试验过程

试验过程分为两个主要步骤:循环孔隙水压的施加和动态常三轴试验。为了保证试验结果的精确性,每种工况采用试件数量为 1~3 个。

1.3.1 循环孔隙水压施加

首先采用围压系统对混凝土试件进行循环孔隙水压预处理。预处理过程中首先采用位移控制方式通过加压阀对试件施加围压,待其接近预设围压 3MPa 时,控制方式变为围压控制,对围压进行精确控制,防止因位移控制速度过快而造成试验误差。保持恒压 3MPa,持续 5h 左右。然后进行正式循环孔隙水压加卸载,采用围压控制方式,在围位移相对平稳时,以 3MPa/min 进行卸压至 1MPa,保持 30min 左右,再以相同速度进行加载至 3MPa,即完成孔隙水压单次循环过程。由此采用该系统编制循环加卸载程序,重复上述步骤,以达到所要求的循环次数 N (0 次、10 次、50 次、100 次和 200 次)。本试验中以混凝土外围水压大小间接表征其内部的孔隙水压力大小。

1.3.2 动态常三轴试验

对试样进行常三轴试验时,不对试样进行密封处理,使其直接与围压水接触。试验时的轴向荷载由加载框架的传立柱通过围压桶顶部的活塞进行施加,侧向荷载由围压水直接作用于试件。三轴试验具体试验过程如下:

(1) 首先对试件进行正式加载。对试件竖向进行预加载,荷载大小为 30kN;然后在保持围压(3MPa)波动范围为 10^{-3} 数量级的情况下,采用位移控制方式,进行不同应变速率的加载试验,直至混凝土试件破坏。

(2) 然后对试件进行卸载和后处理。试件破坏后,停止加载;安全将围压桶下降到初始位置后,慢慢将围压卸载至 0MPa;然后通过空气压缩机向围压桶中加气压将水排出。

(3) 最后对破坏后的试件进行拍照处理并完成试件残渣的清理工作。

2 混凝土变形特性分析

历经不同次数(0 次,10 次,50 次)孔隙水压循环作用后,相对于静态加载速率($10^{-5}/s$)的情况,混凝土在应变速率($10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 、 $10^{-2}/s$)下峰值应变($\times 10^{-3}$,下同)的增幅见表 2。不同应变速率下,相对于 0 次孔隙水压循环的情况,混凝土在历经不同次数(10 次,50 次,100 次,200 次)孔隙水压循环作用后峰值应变及其增幅见表 3。峰值应变随应变速率增幅变化见图 3,峰值应变随孔隙水压循环次数变化见图 4。

表 2 峰值应变随应变速率变化值

Tab. 2 The peak strain changing with strain rate

循环次数(次)	应变速率			
	$10^{-5}/s$	$10^{-4}/s$	$10^{-3}/s$	$10^{-2}/s$
0	2.79/0.0%	2.18/-22.19%	3.58/27.69%	4.69/37.86%
10	2.74/0.0%	2.57/-11.72%	3.82/44.53%	3.66/58.15%
50	3.50/0.0%	2.72/-6.38%	3.83/41.77%	4.44/52.07%

表 3 峰值应变($\times 10^{-3}$)随孔隙水压循环次数变化值

Tab. 3 The peak strain changing with pore water pressure cycles

循环次数(次)	应变速率			
	$10^{-5}/s$	$10^{-4}/s$	$10^{-3}/s$	$10^{-2}/s$
0	2.79/0.0%	2.18/0.0%	3.58/0.0%	4.69/0.0%
10	2.74/-1.79%	2.57/17.89%	3.82/6.70%	3.66/-21.96%
50	3.50/25.45%	2.72/24.77%	3.83/6.98%	4.44/-5.33%
100	/	3.22/47.71%	3.27/-8.66%	/
200	/	2.98/36.70%	3.28/-8.38%	/

由表2和图3得到:相同循环孔隙水循环次数时,峰值应变的增幅随着应变速率的增加整体上呈现增加的趋势。相对于应变速率为 $10^{-5}/s$ 的情况,应变速率为 $10^{-4}/s$ 时的峰值应变出现减小的现象,应变速率为 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$ 时的峰值应变是逐渐递增的,增幅随着应变速率的增加也逐渐增大。由表3和图4可知:同种应变速率下,峰值应变的增幅随着孔隙水压循环的变化并没有明显规律。在应变速率为 $10^{-4}/s$ 时,循环次数达到100次前,峰值应变随着循环次数是逐渐增加的,而达到100次后,峰值应变逐渐下降。应变速率为 $10^{-3}/s$,循环达到50次时,峰值应变已经开始下降,而达到100次以后,峰值应变却基本保持不变。

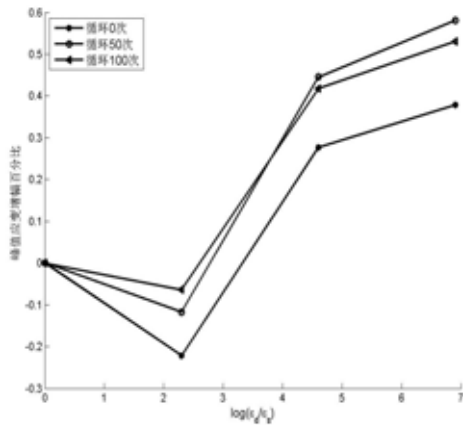


图3 峰值应变随应变速率增幅变化图

Fig. 3 The peak strain changing with strain rate

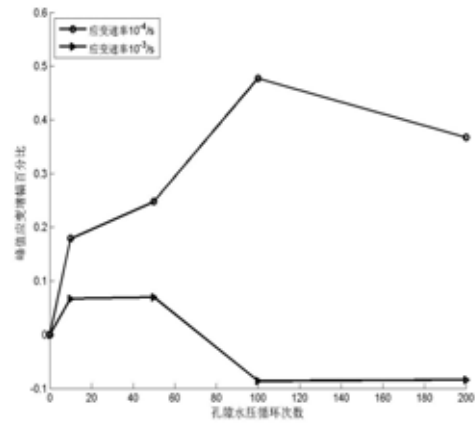


图4 峰值应变随孔隙水压循环次数变化图

Fig. 4 The peak strain changing with pore water pressure cycles

3 混凝土损伤特性分析

3.1 应力差—应变全曲线分析

王乾峰^[1]通过对钢纤维混凝土单轴压缩损伤本构研究得到:当混凝土强度大于40MPa时,采用Lognormal对数正态分布理论描述峰值后的应力—应变关系比Weibull统计分布本构模型更加合适。由此通过对混凝土Weibull统计分布本构模型进行修正,结合Lemaitre等效应变原理,得到混凝土压缩分段式损伤本构方程:

$$\sigma = \begin{cases} E_0 \epsilon \exp \left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{pk}} \right)^m \right] & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{pk} \\ \sigma_{pk} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{pk}} \right)}{c} \right)^2 \right] & \epsilon \geq \epsilon_{pk} \end{cases} \quad (1)$$

损伤变量 D 的表达式:

$$D = \begin{cases} 1 - \exp \left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{pk}} \right)^m \right] & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{pk} \\ 1 - \frac{\sigma_{pk}}{E_0 \epsilon} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{pk}} \right)}{c} \right)^2 \right] & \epsilon \geq \epsilon_{pk} \end{cases} \quad (2)$$

式中, ϵ_{pk} 、 σ_{pk} 和 E_0 为峰值应变、峰值应力和初始弹性模量; m 为应力—应变曲线上段参数; t 为下降段参数,可通过试验数据拟合得到。

试验所得数据为荷载和变形曲线,因此需将其换算为应力和应变。应力 $\sigma = \frac{F}{\pi R^2}$,其中 $R=150\text{mm}$ 为试件的半径;应变 $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$,其中 Δl 为所测量的变形, $l=600\text{mm}$ 为试件的长度。由此基于试验数据得到不同循环孔隙水压循环次数混凝土动态(应变速率为 $10^{-5}/s$ 、 $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 和 $10^{-2}/s$)常三轴试验

应力差($\sigma_1 - \sigma_3$, σ_3 为 3MPa)—应变曲线和拟合曲线,选取部分图形,见图 5~8。图 5 中 a、b、c、d 分别表示 $10^{-5}/\text{s}$ 、 $10^{-4}/\text{s}$ 、 $10^{-3}/\text{s}$ 和 $10^{-2}/\text{s}$; 图 7 和图 8 中的 50b 和 200b 表示应变速率为 10^{-4} , 循环次数分别为 50 次和 200 次,即数字表示循环次数,字母表示应变速率(如图 5),下同。应力差—应变全曲线上升段和下降段参数,见表 4 和表 5。

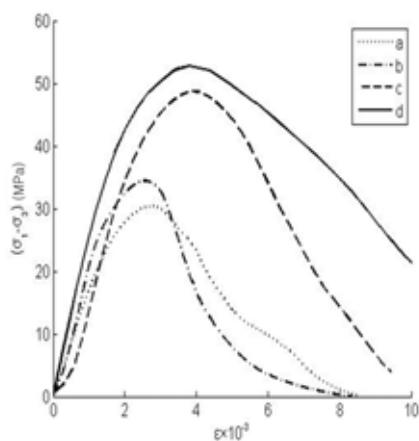


图 5 10 次循环作用后试验曲线对比图

Fig. 5 Test curves after 10 cycles

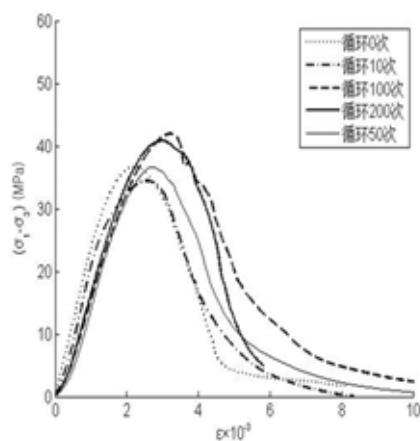


图 6 $10^{-4}/\text{s}$ 下各循环次数试验曲线对比图

Fig. 6 Test curves at strain rate of $10^{-4}/\text{s}$

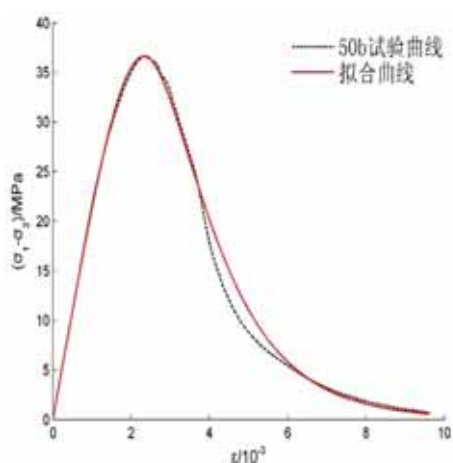


图 7 50b 试验曲线与拟合曲线对比图

Fig. 7 Comparison between 50b test curve and fitting curve

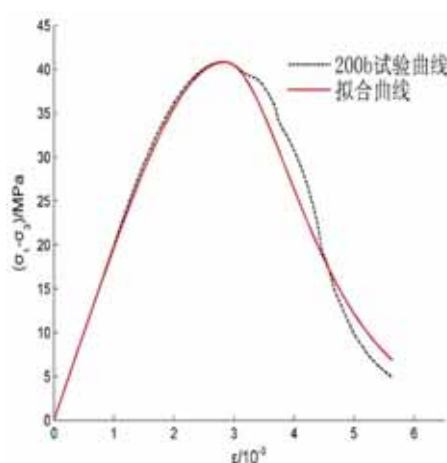


图 8 200b 试验曲线与拟合曲线对比图

Fig. 8 Comparison between 200b test curve and fitting curve

表 4 三轴试验中 m 值统计表

Tab. 4 m in tri-axial test

循环次数(次)	应变速率			
	$10^{-5}/\text{s}$	$10^{-4}/\text{s}$	$10^{-3}/\text{s}$	$10^{-2}/\text{s}$
0	2.855	2.358	1.986	1.809
10	2.185	1.751	1.862	1.755
50	3.254	2.998	1.802	1.832
100	—	2.995	2.113	—
200	—	3.012	2.102	—

表 5 三轴试验中 t 值统计表
Tab. 5 t in tri-axial test

循环次数(次)	应变速率			
	$10^{-5}/s$	$10^{-4}/s$	$10^{-3}/s$	$10^{-2}/s$
0	0.548	0.413	0.357	0.454
10	0.459	0.409	0.504	0.668
50	0.443	0.490	0.501	0.518
100	—	0.452	0.496	—
200	—	0.360	0.402	—

由图 5、图 6 可以看出,混凝土的峰值应力随应变速率增加,有明显的增幅,应力—应变曲线的率敏感性较为明显;而孔隙水压循环次数对其影响程度相对应变速率的影响较弱,变化规律并不明显,有增加有减少。由图 7 和图 8 可知,修正的 Weibull 统计分布模型能够很好地描述常规三轴压缩情况下的混凝土应力差—应变全曲线。

3.2 损伤特性分析

基于试验数据,采用公式(2)进行计算,得出混凝土在历经不同次数的孔隙水压循环作用后在不同加载速率下的损伤变化全过程。结果表明:混凝土三轴受压损伤随着应变的增大而增大,其变化率先增大后减小,最后缓慢发展并趋于稳定。给出不同应变速率下 0 次和 50 次循环以及不同循环次数后应变速率 $10^{-4}/s$ 和 $10^{-3}/s$ 下的混凝土损伤变量 D ,分别见图 9~12。

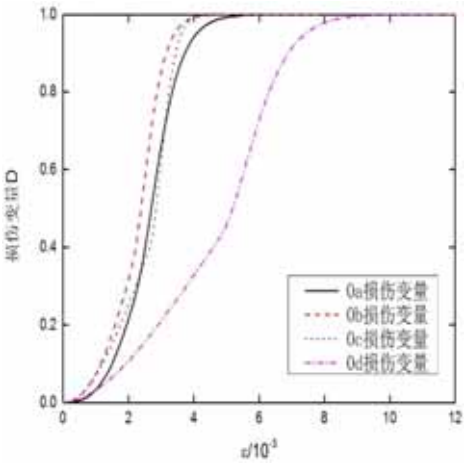


图 9 循环 0 次损伤变量 D
Fig. 9 Damage variable under 0 cycle

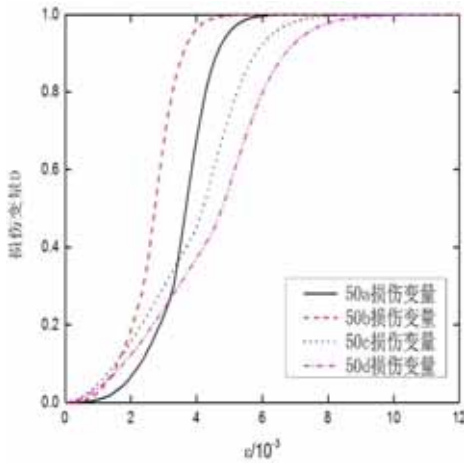


图 10 循环 50 次损伤变量 D
Fig. 10 Damage variable under 50 cycles

由图 9 可知:当循环次数为 0,应变速率低于 $10^{-2}/s$ 时,损伤变量随应变速率的变化并未出现较大幅度的差异,其达到最大值所对应的应变值相差不大;在应变速率为 $10^{-2}/s$ 时,损伤变量曲线出现较大变化,此时损伤变量达到最大时所对应的应变值远远大于其它三种应变速率下对应的值。对比图 9 和图 10 得到:历经不同循环次数孔隙水压作用后,中低应变速率对混凝土损伤变化影响较大,而高应变速率($10^{-2}/s$)的影响相对较小。

由图 11 和图 12 可知:同种应变速率下,孔隙水压循环次数对混凝土损伤演化有较大的影响。当循环次数不大于 100 次时,随着循环次数的增加,损伤变量曲线的变化率呈现减小的趋势,而当循环次数达到 200 次时,损伤变量的增加速度变大,表明高循环次数的孔隙水压作用对混凝土产生了较大的损伤。

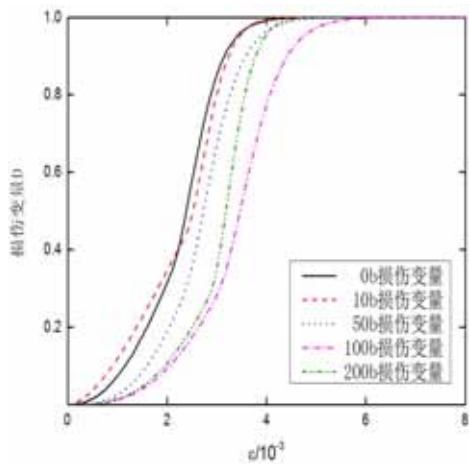
图 11 $10^{-4}/s$ 应变速率下的损伤变量 D

Fig. 11 Damage variable at strain rate of $10^{-4}/s$

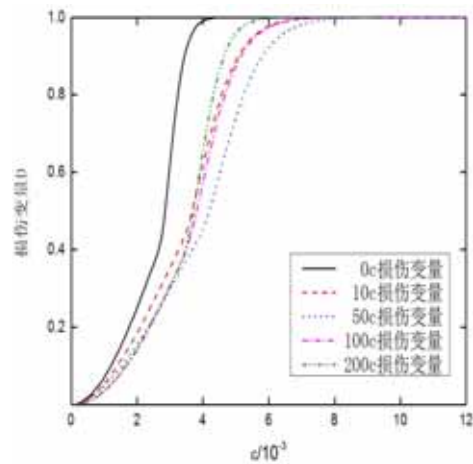
图 12 $10^{-3}/s$ 应变速率下的损伤变量 D

Fig. 12 Damage variable at strain rate of $10^{-3}/s$

由图 9~12 可知:混凝土的损伤演化规律整体上可以分为三个阶段,即损伤起始阶段、损伤发展阶段和损伤失稳阶段。(1)损伤起始阶段,图中应变为 $(0\sim2)\times 10^{-3}$ 范围内。由于混凝土在浇筑成型过程中,内部产生初始缺陷,以及本文中历经不同循环次数孔隙水压的作用,导致加载初期就会出现一定的损伤;(2)损伤发展阶段,图中应变为 $(2\sim6)\times 10^{-3}$ 范围内。随着荷载的施加,混凝土变形逐渐增加,内部微观裂纹逐渐扩展,甚至开裂,出现宏观裂缝;而荷载持续的施加导致混凝土被压实,宏观裂纹闭合,如此往复,砂浆与骨料界面脱离,水泥石开裂,甚至骨料发生断裂,混凝土损伤逐步加剧。在此过程中,由于内部孔隙水不断被挤出,孔隙水压的机械作用逐渐减小,甚至可以忽略;(3)损伤失稳阶段,对应于图中应变为 6×10^{-3} 之后。随着混凝土变形的增大,混凝土损伤增长速度越来越小,最后趋于水平。主要由于混凝土内部损伤发展已经趋于稳定,材料内部已经破坏,无法支撑混凝土基体继续承受更多的荷载。

综上所述,混凝土的破坏过程,实际上是在外界因素的影响下材料内部初始损伤逐步发展,并形成微观裂缝,进而产生新的损伤。随着损伤的累积,微观裂缝会持续发展、进而贯通,形成宏观裂缝。荷载的持续施加,宏观裂缝不断扩展、开裂和闭合,最终将导致混凝土基体无法承受更多的荷载而破坏。

4 结论

通过对历经不同次数的循环孔隙水压作用后的混凝土在围压下的常规三轴动态压缩试验研究,得到结论如下:

(1) 相同孔隙水压循环次数,不同应变速率下的峰值应变增幅规律具有一致性,整体上呈现增大的趋势;但相同应变速率下,其随着孔隙水压循环次数的变化没有明显的规律。

(2) 通过改进的分段式损伤本构模型,得到不同循环次数,不同应变速率下的混凝土应力差—应变全曲线和损伤演化曲线。历经不同循环次数孔隙水压作用后,中低应变速率对混凝土损伤变化影响较大,而高应变速率($10^{-2}/s$)的影响相对较小。同种应变速率下,不同孔隙水压循环次数对混凝土损伤演化有较大的影响。相对于较低循环次数,高循环次数的孔隙水压作用和混凝土内部孔隙水的 Stefan 共同作用开始出现负面影响,致使其损伤发展速度增大。

(3) 混凝土的损伤演化过程包括三个阶段:损伤起始阶段、损伤发展阶段和损伤失稳阶段。损伤起始阶段时,损伤发展较慢,主要由材料初始缺陷和循环孔隙水压造成;损伤发展阶段,随着荷载施加,混凝土变形增大,损伤快速发展,但其变化率呈现减小的趋势;损伤失稳阶段,材料损伤已经达到 90% 以上,损伤变化趋于稳定,混凝土材料已经发生破坏,不再具有承载能力。

参考文献:

- [1] Bjerkei L, Jensen J 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] Chen Z F S, Hu Yu, LI Qingbin, et al. Behavior of concrete in water subjected to dynamic triaxial compression [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2010, 136(3): 379—389.
- [3] Oshita H, Tanabe T. Modeling of water migration phenomenon in concrete as homogeneous material[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(6): 565—572.
- [4] 王春来. 不同围压条件下钢纤维混凝土受压试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2004, 24(4): 4—6 (WANG Chunlai. Compression test of steel fiber reinforced concrete under different confining pressure[J]. Mining Research and Development, 2004, 24(4): 4—6 (in Chinese))
- [5] 闫东明, 林皋, 徐平. 三向应力状态下混凝土动态强度和变形特性研究[J]. 工程力学, 2007, 24(3): 58—64 (YAN Dongming, LIN Gao, XU Ping. Research on characteristic of dynamic strength and deformation of concrete under triaxial stress[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(3): 58—64 (in Chinese))
- [6] 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 Zhongli, DU Shoulai. Experimental study on the influence of high permeability pore water pressure on mechanical properties of concrete[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11): 72—77 (in Chinese))
- [7] 李杰. 混凝土随机损伤力学的初步研究[J]. 同济大学学报, 2004, 32(10): 1270—1277 (LI Jie. Preliminary study on random damage of concrete[J]. Journal of Tongji University, 2004, 32(10): 1270—1277 (in Chinese))
- [8] 李杰. 混凝土随机损伤本构关系—单轴受压分析[J]. 同济大学学报, 2003, 31(5): 505—509 (LI Jie. Random damage constitutive relation of concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Tongji University, 2003, 31(5): 505—509 (in Chinese))

Damage Property Analysis of Concrete Subjected to Conventional Tri-axial Compression under Cyclic Pore Water Pressure

LIANG Hui^{1,2}, PENG Gang^{1,2}, TIAN Wei^{1,2}, HUANG Shi-chao^{1,2}

(1. Geological Disasters in the Three Gorges Area, Hubei Province, and the Ecological Environment of Collaborative Innovation Center, Yichang 443002, Hubei, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture of China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: Conventional tri-axial compression experiment of concrete was carried out at different strain rates ($10^{-5}/s, 10^{-4}/s, 10^{-3}/s$ and $10^{-2}/s$) and with different numbers of cycle of pore water pressure (0, 10, 50, 100 and 200 times), respectively; peak value variation of concrete strain, stress-strain curve and damage characteristics were analyzed. Results show that with the same number of cycles of pore water pressure, the peak values of strain entirely present an increasing trend with the increase of strain rate; while at the same strain rate, the variation of peak strain is not obvious with the variation of cycle numbers of pore water pressure. At low and medium strain rates ($10^{-5} \sim 10^{-3}/s$), number of cycles of pore water pressure has larger impact on concrete damage. When the number of cycles reaches up to 200 times, pore water pressure produces larger damage of concrete. Through the analysis of dynamic damage and failure mechanism of concrete subjected to cyclic pore water action, it is known that the destruction process of concrete is actually the formation, expansion and penetration of internal cracks, and also is a process of generation and accumulation of damage. When damage reaches a certain level, macroscopic damage of concrete happens, and concrete loses bearing capacity.

Keywords: conventional tri-axial compression experiment; number of cycles; pore water pressure; damage and failure