



循环孔隙水作用下混凝土动态特性试验研究

刘博文, 彭刚, 邹三兵, 罗曦

(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: 对 0、10、50 次孔隙水循环下不同应变速率 (10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} /s) 的混凝土和中低应变速率 (10^{-4} 、 10^{-3} /s) 下不同孔隙水循环次数 (0、10、50、100、200 次) 的混凝土进行了常三轴压缩试验, 试件尺寸为 $\phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 。对循环孔隙水压作用后混凝土的峰值应力物理力学参数的变化规律进行了统计分析, 并对混凝土在不同加载速率下的吸能变化规律进行了分析。结果表明: 随着应变速率增大, 混凝土的峰值应力呈增大趋势, 随孔隙水压循环次数的增加, 峰值应力大体呈现先增大后减小的阶段性变化; 混凝土的吸能能力随加载速率的增加, 表现出明显增大的趋势。混凝土的吸能能力随孔隙水压循环次数的增加表现出一定的离散性, 但整体上呈先增大后减小的趋势; 选用基于 Weibull 统计理论的混凝土材料分段式动态损伤本构模型对试验数据进行拟合, 经验证, 此模型与试验结果吻合较好。

关键词: 混凝土; 孔隙水压力; 循环; 常三轴

中图分类号: TU502; TU528.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2015)05-0088-07

Experimental analysis of dynamic properties of concrete under cyclic pore water effects

Liu Bowen, Peng Gang, Zou Sanbing, Luo Xi

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

Abstract: Triaxial compression tests for concrete of size $\Phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ was carried out under different strain rate (10^{-5} , 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} /s) in 0, 10, 50 cycle of pore water and low strain rate (10^{-4} /s, 10^{-3} /s) in different cycles pore water pressure (0, 10, 50, 100, 200 times). Comparatively analysis the changes law characteristics about of basic physical mechanics parameters, such as peak stress and absorption of concrete under different loading rate are analyzed. The results show that: concrete peak stress increases with strain rate and with the number of pore water pressure cycles, the concrete peak stress increases at the first and then declines. with the number of pore water pressure cycles, shows the change of stages; Concrete absorption energy capability is loaded with the strain rate, and showed significant increasing trend. Energy

收稿日期: 2015-06-12

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项目 (2014CX022)

作者简介: 刘博文 (1992-), 男, 主要从事混凝土材料动态特性研究, (E-mail) 1696327945@qq.com.

彭刚 (通信作者), 男, 教授, (E-mail) 871399412@qq.com.

Received: 2015-06-12

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51279092); China Three Gorges University Graduate Student Research and Innovation Fund Project (No. 2014CX022)

Author brief: Liu Bowen (1992-), main research interest: dynamic characteristics of concrete materials, (E-mail) 1696327945@qq.com.

Peng Gang (corresponding author), professor, (E-mail) 871399412@qq.com.

absorption capacity of concrete pore water pressure increases with the number of cycles showed shows some discrete, but overall increase first and then decrease; Finally, choose sectional dynamic damage constitutive model of concrete material which is based on statistical theory Weibull is applied to of sectional dynamic damage constitutive model based on Weibull for analyse concrete material fitting oto fit with f experimental data, verified, and the results show that this model has good agreement with the test results.

Key words: concrete; pore water pressure; circulation; triaxial compressive

混凝土是目前应用范围最广的工程材料,以大坝、隧洞、桥墩等为代表的水工混凝土结构,不仅长期处于水环境围压作用下,还长期受到水浪的冲击,而这类环境对混凝土的内部微观结构和力学性质均存在较大影响。学者们对水环境中的混凝土进行了各种研究,并取得了丰富的研究成果。Butler^[1]阐明造成混凝土发生破裂的原因为主动孔隙水压力使材料产生拉应变。Yaman 等^[2]研究了混凝土材料在不同孔隙率和孔隙中含水量作用下,对其强度、弹性模量等力学特性的影响。王海龙等^[3]认为混凝土中的孔隙水压力减小了阻碍混凝土开裂的摩阻力,与干燥态的混凝土相比,湿态混凝土的开裂应力和抗压强度都有所降低。杜守来等^[4]发现在孔隙水压的作用下,混凝土的抗压强度有所降低,并随着孔隙水压的增加逐渐降低。杜修力等^[5]推导得到饱和混凝土的有效抗拉强度及其峰值应变与孔隙率之间的关系。姚家伟等^[6]结合单轴试验将 Jones-Netson-Morgan 模型用于混凝土材料本构分析,建立非线性本构模型,该模型能用于混凝土复杂应力下的本构分析。彭刚等^[7]对有压孔隙水环境中的混凝土进行动态抗压试验,并建立了相应的本构模型。熊益波等^[9]运用灵敏度分析识别了 JH 模型的关键参数,拟合了应变率 200~500 s⁻¹ 范围的率相关参数。综上所述,对水环境中混凝土研究很多,但对孔隙循环水作用的混凝土的率效应研究较少。为了更加明确水下工作的混凝土结构受到水浪冲击和水压作用下抗压强度的变化,对 0、10、50 次孔隙水循环下不同应变速率的混凝土和中低应变速率(10⁻⁴、10⁻³/s)下不同孔隙水循环次数的混凝土进行了常三轴压缩试验,并构建相应的动态本构模型。

1 试验设计

1.1 试件制备

试验所用的混凝土试件为 $\phi 300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 的圆柱体,水泥采用宜昌三峡水泥有限公司生产的

P·O 42.5 硅酸盐水泥;粗骨料分别采用 5~40 mm 连续级配碎石,细骨料采用细度模数为 2.3 的天然河砂;采用自来水搅拌。试件成型后在室温下静置 24 h 后拆模并编号,将编号后的试件拆模,按 20~40 mm 的间距摆放在木质垫条上,自然养护 28 d。混凝土配合比为水:水泥:砂:石子=0.5:1.00:2.28:3.72(按质量计),水灰比为 0.5。

1.2 加载试验

加载设备采用三峡大学 10 MN 大型多功能液压力伺服静动力三轴仪,可分别进行单轴试验、常三轴试验($\sigma_2 = \sigma_3$)、真三轴试验($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$)、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,动力加载应变速率范围为 10⁻⁵~10⁻²/s。利用围压桶对混凝土试件进行加压,最大围压和最大孔隙水压力值为 30 MPa。加载框架对试件进行轴向加载,竖向最大动、静力加载值分别为 5 000、10 000 kN,各项指标满足试验要求。

对混凝土试件进行不同次数的孔隙水压循环预处理:

1) 将混凝土试件置于围压桶内,往桶中充水,待水充满后,以围位移控制方式给试件施加围压,待接近所设围压值时转换控制方式,以围压进行控制,达到围压值 3 MPa 后,保持恒压 5 h 左右。

2) 用“围压控制”方式控制孔隙水压力进行上、下限加卸载。待围位移不再发生较大变化时,以 3 MPa/min 的速率从上限值 3 MPa 开始卸载到下限值 1 MPa,保持 30 min,再以 3 MPa/min 的速率从下限值开始加载到上限值 3 MPa。

3) 设定软件循环控制程序,不间断重复上述步骤 2),直至完成预定的设置的循环次数 N 。

对试件进行三轴试验时,不对试件采取密封措施,使其直接与水接触。试验时的轴向荷载由加载框架的传力柱通过围压桶顶部的活塞直接传递到试样上,侧向荷载由围压水直接作用在试件上。试验过程如下:

1)正式加载。启动油泵并加压,顶升至试件与上部传力柱接触,给试件预加 30 kN 的初始静荷载,按设定的加载速率对试件进行加载直至试件破坏,加载过程中保证围压 3 MPa 恒定不变,围压的变化范围控制在 0.001 MPa 量级。

2)卸载及后续处理。试件破坏后,停止加载并将围压桶下降到初始位置,慢慢将围压卸载至 0 MPa,然后将水排净,吊起围压桶盖,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 试验结果分析

试验测得 0、10、50 次孔隙水循环下不同应变速率(10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} /s)的混凝土和中低应变速率(10^{-4} 、 10^{-3} /s)下不同孔隙水循环次数(0、10、50、100、200 次)的混凝土在常三轴压缩试验下的峰值应力见表 1。

表 1 混凝土的峰值应力
Table 1 Concrete peak stress MPa

循环次数	应变速度/s			
	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}
0	36.83/	45.00/	47.02/	50.77/
	—	22.2%	27.7%	37.8%
10	35.76/	39.96/	51.69/	56.56/
	—	11.7%	44.5%	58.6%
50	37.80/	40.21/	53.58/	57.48/
	—	6.4%	41.7%	52.7%
100		45.40/	58.09/	
		—	27.9%	
200		44.33/	50.08/	
		—	12.9%	

注:表中数据为“平均值/增幅”,增幅为“—”表示该值为基准值。

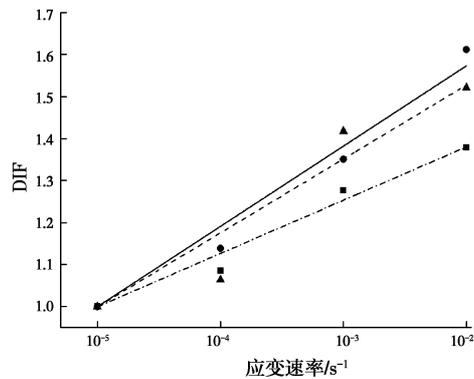
由表 1 知历经不同次数孔隙水压循环作用后的混凝土抗压峰值应力均随应变速率的增加而增大。这一结论与彭刚等^[7]关于混凝土在干燥无水状态和饱和有水状态单轴受压下峰值应力随应变速率的增加而增加的变化规律一致。在单轴压状态下,干燥无水环境和饱和有水环境的峰值应力的最大增幅分别为 34.13%和 39.38%,与试验数据中混凝土历经 0、10、50 次循环作用下峰值应力的最大增幅分别是 37.8%、58.2%、52.1%相比,可进一步得出孔隙水循环次数与围压的存在提高了混凝土的速率敏感

性。同时,闫东明等^[8]指出混凝土在 0 MPa 围压下,混凝土动态强度随着应变速率的增加而增加,随着混凝土围压的增加,应变速率对混凝土动态强度的影响作用逐渐减弱,因此,复杂应力的大小在一定程度上会对混凝土的率效应存在影响,但应力状态的不同并不改变混凝土速率敏感性。由于对孔隙水循环作用后混凝土的动态特性方面没有研究,尚未通过文献了解循环次数对混凝土抗压强度的影响是否会因混凝土的应力状态不同而不同。

闫东明等^[8]研究认为混凝土动态强度与应变速率的对数呈线性关系。取 10^{-5} /s 为准静态应变速率,历经 0、10、50 次循环作用后,混凝土抗压强度随应变速率的增加幅度与应变速率的对数之间的关系用式(1)进行拟合。

$$DIF = 1 + \alpha \lg(\dot{\epsilon}_c / \dot{\epsilon}_{cs}) \quad (1)$$

式中:DIF(dynamic increase factor)为混凝土动态抗压强度增长因子,表达式为 $DIF = \sigma / f_{cs}$, σ 为当前应变速率下极限抗压强度值, f_{cs} 为拟静态应变速率下的抗压强度值; $\dot{\epsilon}_c$ 为当前的应变速率; $\dot{\epsilon}_{cs}$ 为拟静态的应变速率,取 10^{-5} /s; α 为试验拟合参数。



注: ■ 0次循环试验点 ● 10次循环试验点
▲ 50次循环试验点 --- 0次循环拟合曲线
— 10次循环拟合曲线 - - - 50次循环拟合曲线

图 1 混凝土强度增量与应变速率的关系
Fig. 1 Relationship between concrete strength increment and strain rate

表 2 DIF 拟合参数
Table 2 DIF fitting parameter

循环次数	α	R^2
0	0.127	0.975
10	0.191	0.976
50	0.176	0.915

由表 2 可知,由式(1)拟合所得拟合相关度 R^2 均大于 0.9,表明其能够较好地反应混凝土峰值应力增幅随应变速率的变化规律。

由表 1 可知,混凝土的峰值应力随孔隙水压循环次数的增加,大体呈现出先增大后减小的阶段性变化,这与上述的拟合关系吻合。孔隙中的自由水以及孔隙水压循环作用对混凝土力学性能的影响主要表现在两个方面。一是渗透压力使混凝土内部产生更多的微裂缝;二是孔隙水在孔隙界面上产生的黏性效应,即 Stefan 效应。混凝土的峰值应力随孔隙水压循环次数的增加,表现出阶段性变化,当循环次数不大于 100 次时,峰值应力呈增大的趋势,当循环次数达到 200 次时,峰值应力开始减小。当循环次数不大于 100 次时,孔隙水的渗透压力作用使混凝土产生有限的损伤,产生一定数量厚度很薄的毛细裂缝,经历孔隙水循环作用后,混凝土孔隙中充满了自由水,当受到外部荷载时,孔隙在变形过程中就会产生强烈的 Stefan 效应,即产生阻止微孔隙扩展的阻力,并且在一定的循环次数范围内,介质内饱和的自由水越多,Stefan 效应表现得越明显,最终导致混凝土的强度的增大。当循环次数进一步增加,达到 200 次时,孔隙水的渗透压力作用使混凝土产生较大的损伤,毛细裂缝发展成为微裂缝甚至是宏观裂缝,尽管还会产生新的毛细裂缝并在受到外部荷载时有 Stefan 效应产生,但宏观裂缝中的孔隙水机械作用占据主导地位,导致了混凝土强度的降低。因此,混凝土随循环次数表现出峰值应力的阶段性变化主要是在一定次数的循环水循环作用后由于 Stefan 效应增强了混凝土的抗压强度,但超过这一限定后,由于孔隙水的渗透压力造成内部细微损伤产生毛细裂缝从而减小了混凝土的抗压强度。在试验加载过程中,加载框架的传力柱通过顶部活塞施加轴向荷载传递到试件上,围压水施加的侧向荷载直接作用在试件上。当实验过程中施加围压时,对轴压混凝土有一个紧箍作用,阻碍裂缝的发展。同时,当应变速率增大,混凝土材料内部裂缝则直接穿过粗细骨料快速发展,而不再沿着强度较弱的过渡区域发展,使得更多的骨料被拉断。从而混凝土骨料的抗拉强度比过渡区大,进而提高混凝土的极限抗压强度。

3 混凝土吸能能力分析

混凝土的吸能能力是混凝土产生裂缝以至发生

破坏所吸收的能量,反映材料内在力学性能的大小,Watstein^[10]、Takeda 等^[11]的研究表明,随着应变速率的增加,混凝土吸能能力也相应增加,计算式为

$$S = UV = V \int_0^{\epsilon_{\max}} \sigma d\epsilon \quad (2)$$

式中: S 为材料吸能能力; U 为单位体积的能量密度; V 为体积; σ 为应力; ϵ 为应变; ϵ_{\max} 为峰值应变。用式(2)对试验曲线进行计算,得到历经不同次数孔隙水压循环作用后的混凝土在不同应变速率(10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} /s)下的吸能能力值见表 3。

表 3 不同应变速率下混凝土吸能值
Table 3 Concrete absorption energy values

循环次数/次	应变速率/s ⁻¹			
	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²
0	48.34	49.97	73.45	152.31
10	55.14	55.62	107.18	137.10
50	68.00	53.31	129.51	158.19
100		77.88	123.33	
200		72.60	96.38	

由表 3 可知,混凝土的吸能能力随加载速率的增加,表现出明显增大的趋势。混凝土的吸能能力随孔隙水压循环次数的增加表现出一定的离散性,但整体上呈先增大后减小的趋势,这与混凝土峰值应力随循环次数的变化规律比较接近。

4 混凝土损伤本构模型建立

根据应变等效原理^[11],在单轴受力状态下,受损材料的任何应力-应变本构关系可以从无损材料的本构方程来导出,只要用损伤后的有效应力来取代无损材料本构关系中的名义应力即可。设由于材料内部损伤,实际承担载荷的未受损的等效阻力体积为 V_n ,损伤区的体积为 V_d ,总体积(名义体积)为 V ,由 $V = V_n + V_d$,引入损伤变量 $D = V_d/V$ ($0 \leq D \leq 1$)。从而有效应力为 $\sigma_n = \sigma/(1 - D)$,即 $\sigma = (1 - D)\sigma_n$,由 $\sigma_n = E\epsilon$ 得

$$\sigma = E(1 - D)\epsilon \quad (3)$$

研究表明,采用 Weibull 分布可以较好地模拟混凝土等脆性材料的单元强度分布规律。Weibull^[13]在 1939 年提出了一直沿用至今的以链条

模型为基础的脆性破坏统计理论。该模型认为结构的各基本单元相互独立,且各单元的性质相互独立,呈随机分布,当某个结构的某个单元发生破坏时就可能引起整个结构的失稳,犹如链条模型,一环破坏将导致整个链条破坏。王春来等^[14]认为材料的损伤参数 D 服从 Weibull 统计分布特点,并给出了相应的损伤模型。王乾峰^[15]却指出当混凝土强度超过 40 MPa 时,Lognormal 对数正态分布用于描述峰值后的应力-应变关系,比 Weibull 统计分布更合适。

对峰值后建立的应力-应变关系为

$$\sigma = a \exp\{-1/2 [\ln(\epsilon/b)/t]^2\} \quad (4)$$

其几何边界条件由 $\epsilon = \epsilon_{pk}$ 、 $d\sigma/d\epsilon = 0$ 、 $\epsilon = \epsilon_{pk}$ 、 $\sigma = \sigma_{pk}$ 决定,对式(4)求导可得

$$d\sigma/d\epsilon = -a \ln(\epsilon/b)/(t^2 \epsilon) \exp\{-1/2 [\ln(\epsilon/b)/t]^2\} \quad (5)$$

将边界条件代入式(5)可得

$$b = \epsilon_{pk} \quad (6)$$

将边界条件及式(6)代入式(4)可得

$$a = \sigma_{pk} \quad (7)$$

即得峰值后的应力-应变关系为

$$\sigma = \sigma_{pk} \exp\{-1/2 [\ln(\epsilon/\epsilon_{pk})/t]^2\} \quad (8)$$

根据应变等价原理可得

$$\epsilon = \sigma/\tilde{E} = \tilde{\sigma}/E = \sigma/[(1-D)E] \quad (9)$$

即

$$\sigma = E(1-D)\epsilon \quad (10)$$

从而,建立损伤模型为

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon \{ \exp[-1/m (\epsilon/\epsilon_{pk})^m] \} & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{pk} \\ \sigma_{pk} \exp\{-1/2 [\ln(\epsilon/\epsilon_{pk})/t]^2\} & \epsilon \geq \epsilon_{pk} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ϵ_{pk} 、 σ_{pk} 和 E 为峰值应变、峰值应力和弹性模量; m 和 t 分别为上升段和下降段的形状控制参数,其中 $m = 1/\ln(E\epsilon_{pk}/\sigma_{pk})$, t 需要通过对应力-应变全曲线拟合后得到。

利用式(11)对加载速率 $10^{-5}/s$ (循环 0、10、50 次)和 $10^{-3}/s$ (循环 0、10、50 次)下混凝土试件进行验证,见图 2~7。图中 a 、 c 分别对应 $10^{-5}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 。

由图 2~7 可以看出,修正的 Weibull 统计分布模型能够很好地对三轴压缩情况下的混凝土应力-应变全曲线进行拟合。建立的本构模型对实测混凝土试验加载全过程曲线拟合效果较好,尤其对混凝土峰值前后的拟合优于以往模型。表明该模型

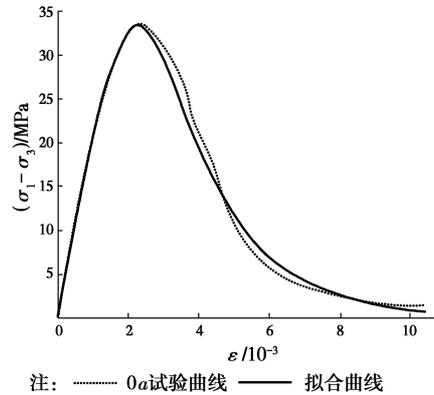


图 2 10^{-5} 速率下 0 次循环试验曲线与拟合曲线对比图
Fig. 2 10^{-5} rate 0 times cycle curve and curve comparison chart

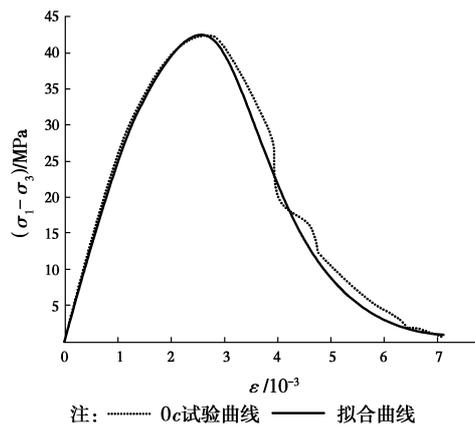


图 3 10^{-3} 速率下 0 次循环试验曲线与拟合曲线对比图
Fig. 3 10^{-3} rate 0 times cycle curve and curve comparison chart

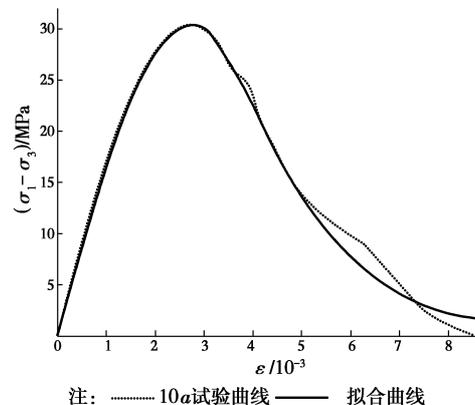


图 4 10^{-5} 速率下 10 次循环试验曲线与拟合曲线对比图
Fig. 4 10^{-5} rate 10 times cycle curve and curve comparison chart

具有广泛的工程应用前景,且该模型参数少,便于工程应用。

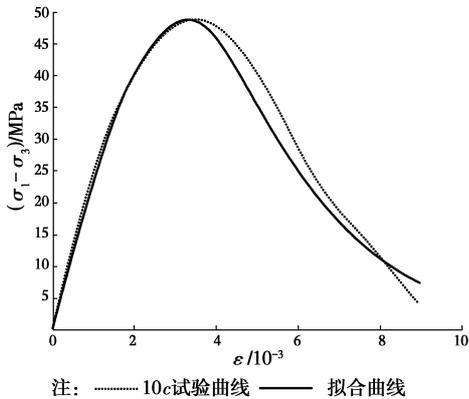


图 5 10^{-3} 速率下 10 次循环试验曲线与拟合曲线对比图

Fig. 5 10^{-3} rate 10 times cycle curve and curve comparison chart

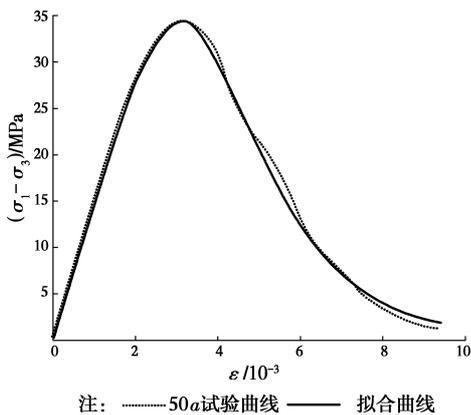


图 6 10^{-5} 速率下 50 次循环试验曲线与拟合曲线对比图

Fig. 6 10^{-5} rate 50 times cycle curve and curve comparison chart

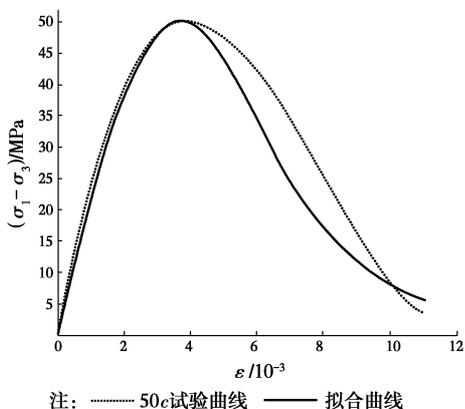


图 7 10^{-3} 速率下 50 次循环试验曲线与拟合曲线对比图

Fig. 7 10^{-3} rate 50 times cycle curve and curve comparison chart

5 结 语

通过试验实测数据分析不同孔隙水压循环次数、不同应变速率两种因素对混凝土性能的影响,得出如下结论:

1) 混凝土峰值应力随应变速率的增加而增大。历经 0、10、50 次循环作用后,混凝土抗压强度随应变速率的增幅与应变速率的对数之间呈线性关系。

2) 混凝土的吸能能力随加载速率的增加,表现出明显增大的趋势。混凝土的吸能能力随孔隙水压循环次数的增加表现出一定的离散性,但整体上呈先增大后减小的趋势,与混凝土峰值应力随循环次数的变化规律较接近。

3) 试验结果证明,建立的 Weibull-lognormal 分段损伤本构模型,较好描述了三轴受压的混凝土在不同应变速率下的损伤特性。

参考文献:

- [1] Butler J E. The influence of pore pressure upon concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1981, 33(114): 3-17.
- [2] Yaman I O, Hearn N, Aktan H M. Active and non-active porosity in concrete part I: experimental evidence [J]. Materials and Structures, 2002, 35(3): 102-109.
- [3] 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): 141-144/179. Wang H L, Li Q B. Effect of pore water on the compressive strength of wet concrete [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 141-144/179. (in Chinese)
- [4] 杜守来,李宗利,金学洋. 孔隙水压对混凝土抗压强度影响的初步研究 [J]. 人民长江, 2009, 40(3): 54-56.
- [5] 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, 43(6): 667-674. Du X L, Jin L. Research on the effective modulus and tensile strength of saturated concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(6): 667-674. (in Chinese)
- [6] 姚家伟,孙士勇,陈浩然. 混凝土多轴非线性本构模型的研究 [J]. 混凝土, 2011(4): 23-26. Yao J W, Sun S Y, Chen H R. Nonlinear constitutive model research on concrete (multiaxial) [J]. Concrete, 2011(4): 23-26. (in Chinese)

- [7] 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)
- [8] 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 D M, Lin G, Xu P. Dynamic strength and deformation of concrete in triaxial stress states [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24 (3): 58-64. (in Chinese)
- [9] 熊益波,陈剑杰,胡永乐,等. 混凝土 Johnson-Holmquist 本构模型关键参数研究[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 121-127.
Xiong Y B, Chen J J, Hu Y L, et al. Study on the key parameters of the Johnson-Holmquist constitutive model for concrete [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 121-127. (in Chinese)
- [10] Watstein D. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete [J]. ACI Materials Journal,1953, 49(8): 729-744.
- [11] Takeda J, Tachikawa H, Fujimoto K. Mechanical behaviour of concrete under higher rate loading than in static test, mechanical behaviour of materials [M]. Kyoto: Society of Materials Science, 1974: 479-486.
- [12] Lemaitere J. Local approach of fracture [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25 (5/6):523-537.
- [13] Weibull W. The phenomenon of rupture in solids [M]. Stockholm: Generalstabena Litografiska Anstalts Forlag, 1939.
- [14] 王春来,徐必根,李庶林,等. 单轴受压状态下钢纤维混凝土损伤本构模型研究[J]. 岩土力学,2006,27(1): 151-154.
Wang C L, Xu B G, Li S L, et al. Study on a constitutive model of damage of SFRC under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (1): 151-154. (in Chinese)
- [15] 王乾峰. 钢纤维混凝土动态损伤特性研究[D]. 湖北宜昌:三峡大学,2009.
Wang Q F. Study on dynamic damage characteristics of steel fiber reinforced concrete [D]. Yichang, Hubei: China Three Gorges University, 2009. (in Chinese)
- [16] 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, 29(4):31-37
Huang Q P. Stochastic micro-viscous damage model for concrete based on the Stefan effect [J]. Structural Engineers, 2013, 29(4):31-37. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)