DOI:10.19322/j. cnki. issn. 1006-4710. 2017. 04. 016

# 饱和混凝土循环荷载后动态抗压性能研究

徐童淋1,彭 刚1.2,杨乃鑫1,柳 琪1

(1. 三峽大学 土木与建筑学院,湖北 宜昌 443002; 2. 三峽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)

**摘要:**本文利用静动力三轴仪对 φ150 mm×300 mm 圆柱体饱和混凝土试件在不同机械荷载循环 (0次、25次、50次、100次)后进行了动静态单轴压缩试验。试验结果表明:经历循环荷载后饱和混 凝土峰值应力随应变速率的增大而增大,随循环荷载次数的增大呈现先增大后减小的规律;峰值应 变随应变速率的增大总体呈增大的趋势,随循环荷载次数增大呈现先增大后减小的规律;弹性模量 随应变速率的增大整体上出现增大的趋势。选用基于 Weibull 统计理论的动态损伤本构模型对试 验数据进行拟合,该模型能够较好模拟饱和混凝土本构关系。

关键词: 饱和混凝土; 荷载循环次数; 应变速率; 峰值应力; 本构模型 中图分类号: TV431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4710(2017)04-0469-07

# Studies of the dynamic uniaxial compressive properties of saturated concrete after mechanical cyclic loading

XU Tonglin<sup>1</sup>, PENG Gang<sup>1,2</sup>, YANG Naixin<sup>1</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in Three

Gorges Area, Yichang 443002, China)

**Abstract**: To study the dynamic mechanical properties of saturated concrete after mechanical cyclic loading, the uniaxial compression tests of concrete specimens with varied numbers of mechanical cyclic loading are carried out at the 10 MN triaxial static-dynamic instrument under different loading rates. The results show that for the concrete specimens with varied numbers of mechanical cyclic loading, the peak stress increases with the strain rate, while the peak stress increases and then decreases with the number of mechanical cyclic loading. The peak strain increases with the strain rate in general, while it increases and then decreases with the number of cyclic loading. The elastic modulus increases with the strain rate in general. The dynamic damage constitutive model based on the Weibull statistical theory fits the experimental data with the result that the model is in agreement with the experimental data of saturated concrete.

Key words: saturated concrete; number of cyclic loading; strain rates; peak stress; constitutive model

大坝、桥墩、海洋平台等结构长期在水环境中工作,而循环荷载在上述结构中十分普遍,如大坝水位的变动,桥梁车辆的移动等。任何结构在服役期间都不可避免会遭遇地震作用,会对混凝土结构的设计强度、使用年限等产生一定的影响。近年来,国内外学者对水环境中混凝土动静态特性做了大量研究<sup>[1-10]</sup>,但混凝土损伤力学与应用研究偏重理论,而

混凝土损伤试验研究难度较高,混凝土动态抗压试 验与加载历史对混凝土动态损伤特性影响研究不够 充分,对水环境与机械荷载循环后混凝土动态性能 研究还较少,而循环荷载历史在一定程度上又能模 拟地震动力响应。

为此,本文对 C30 混凝土历经四种机械荷载循环(0次、25次、50次、100次)在四种应变速率

收稿日期: 2016-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279092,51579139);三峡大学研究生科研创新基金资助项目(SDYC2016024)

作者简介:徐童淋,男,硕士,研究方向为混凝土材料动力特性与结构抗震。E-mail:379933709@qq.com

通讯作者: 彭刚,男,教授,博导,研究方向混凝土材料动力特性与结构抗震。E-mail:gpeng158@126.com

(10<sup>-5</sup>/s、10<sup>-4</sup>/s、10<sup>-3</sup>/s、10<sup>-2</sup>/s)下进行单轴压缩 试验,考虑混凝土离散型对数据的影响,每个工况为 三次试验数据取平均值。

# 1 试验设计

#### 1.1 试验设备

本试验采用三峡大学 10 MN 大型多功能液压 伺服静动力三轴仪,可独立或同时加载。竖向最大 动、静力加载值可达到 5 000 kN、10 000 kN,应变速 率范围为  $10^{-5} \sim 10^{-2}/s$ 。围压系统可对混凝土试 件进行加压处理,可加载最大围压和最大孔隙水压 力值为 30 MPa。主要试验设备见图 1。



(a) 10MN动静力三轴仪
 (b) 水围压桶
 图 1 主要试验设备
 Fig. 1 Mainly experimental instruments

#### 1.2 饱和试件的制备

试验制备尺寸为 φ150 mm×300 mm 圆柱体试 件,强度等级 C30。采用所用P.O42.5普通硅酸盐 水泥;饮用水搅拌;粗骨料选用粒径直径范围 5~30 mm 连续级配的碎石,属二级配;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 1.8。 混凝土配合比为粗骨料:细骨料:水:水泥=4.32: 2.33:0.60:1(按质量计),水灰比 0.60。

试件浇筑完成后,在标准条件下养护 28 天后取 至室外自然养护。为避免出现偏心受压以及应力集 中,对试件表面进行磨平处理。然后对试件进行水 饱和处理,先将试件称重然后放入自然条件下养护 七天,隔天取出进行称重,当试件质量恒定时,即为 自然湿度混凝土质量。然后将称重后的试件用围压 桶进行一次水饱和处理,在水环境加载系统中加压 (围压 2 MPa)处理 16~17 h后,计算机数据采集系 统软件中水环境加载系统中显示驱动器位移不随时 间改变且围压恒定不变,见图 2 和图 3。软件显示 围压和位移不随时间而变化,则认为混凝土试样已 经达到水饱和。试件处理完成后,关闭油源系统,用 控制系统将水环境设备水压降至自来水压力,打开 出水阀,将围压桶中水排净,拆开围压桶取出试件。



图 2 水环境系统加压时间曲线

Fig. 2 Pressurizing curve in water environmental systems



#### 1.3 试验过程

1)预加载;装样,检查与安装变形计后,连接计 算机采集变形计数据。先采用位移控制以 30 mm/min的速度将油缸上升至试件与上部传力柱即 将接触,再采用移动转换控制命令以 5 mm/min 的 速度,限制接触力 10 kN 使得试件与上部传力柱完 全接触,最后采用负荷控制命令对试件预加载至 20 kN,加载速率为 200 N/s,使垫块与试件之间密实。

2) 施加即定周期的循环荷载历史;按照余弦波 的加载方式进行循环加载,以9800 N/s的速度将 试件加载至140 kN,完成幅值60 kN,频率0.1 Hz, 循环周期(0次、25次、50次、100次)的循环荷载历 史。循环荷载历史时程变化过程为:

$$F = A\cos(2\pi ft) + F_0 \tag{1}$$

式中:F为荷载;A为幅值;f为循环频率;t为循环 时间变量; $F_0$ 预加荷载值。完成循环加载后,按照 相同的速度(9800 N/s)卸载到 20 kN。

荷载循环过程荷载时间曲线见图 4。

3) 以设定的应变速率(10<sup>-5</sup>/s、10<sup>-4</sup>/s、10<sup>-3</sup>/s、10<sup>-2</sup>/s)单调加载直至试样失去受压承载力直到破坏。加载全过程荷载时间曲线见图 5。

4)卸载:试件破坏后,停止加载并保存试验数据,将油压调至2 MPa以恒定位移控制将小车下降 至初始位置,关闭油泵、冷却系统及计算机控制软件,拍照并清理残渣。



#### 2 基本力学参数分析

# 2.1 峰值应力分析

经历不同循环加载后的饱和混凝土在四种应变 速率下的峰值应力统计值见表 1。经历不同循环荷 载次数后饱和混凝土峰值应力与应变速率的趋势见 图 6。不同应变速率下饱和混凝土峰值应力与循环 荷载次数的关系见图 7。

表 1	历	经循	环荷载	后行	泡和	混凝土	上的峰	值」	立力(	单位	: MPa	)
Tab.	1	Peak	stress	of	satu	rated	concre	ete	after	mech	anica	l
				c	cyclic	e load	ing					

<b>应</b> 亦 速 亥 /。	不同循环荷载历史次数					
应文还平/8	0次	25 次	50次	100次		
$10^{-5}$	24.52	24.57	28.25	27.63		
$10^{-4}$	27.69	27.97	30.69	29.27		
$10^{-3}$	28.37	29.27	31.20	30.35		
$10^{-2}$	30.57	31.59	33.57	32.84		







图 7 峰值应力随循环荷载次数的关系 Fig. 7 Peak stress with the number of cyclic loading

由图 6 可知, 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为近似线性关系, 可以用如下经验公式来描述<sup>[11]</sup>:

$$f_{\rm c}/f_{\rm cs} = \alpha \lg(\epsilon_{\rm c}/\epsilon_{\rm cs}) + 1 \tag{2}$$

式中: $f_c/f_s$ 表示混凝土动态抗压强度增长因子, $f_c$ 为当前应变速率下的抗压强度, $f_c$ 为准静态应变速 率下的抗压强度; $\epsilon_c$ 为当前的应变速率; $\epsilon_c$ 为准静态 应变速率,取为  $10^{-5}/s;\alpha$  为材料参数,可以通过对 试验数据的拟合得出。

采用式(2)利用最小二乘法对饱和混凝土的动态强度进行拟合,所得参数见表 2,混凝土动态抗压强度增量与应变速率关系变化见图 8,可以看出式(2)能够较好的反应混凝土峰值应力值随应变速率的变化规律。

	表 2 月	亢压强度堆	曾长因子	拟合参	敎教表	
Tab. 2	Compressiv	e strength	growth	factor	fitting	parameter

荷载历史	α	$R^2$
0	0.084 5	0.971 9
25	0.098 4	0.984 8
50	0.061 4	0.974 5
100	0.058 7	0.986 8



图 8 峰值应力增量与应变速率的拟合图 Fig. 8 Peak stress increment with strain rate fitting graph

由表 1~2 和图 6~8 可得如下结论:

 当循环荷载次数相同时,饱和混凝土的峰值 应力随应变速率的提高而明显增大。在高应变速率 加载时,材料内裂缝来不及扩展,直接穿透粗骨料破 坏,故强度得以提高。这与文献[12]在有压水环境 中单轴受压情况下峰值应力随应变速率增加而增加 的结论一致。

2)在应变速率相同时,混凝土的峰值应力随循环荷载历史次数表现出现增大后减小的规律,经历 50次循环荷载历史次数后混凝土的峰值应力达到 峰值,随着循环荷载次数继续增加混凝土的峰值应 力逐步降低。原因分析如下:循环荷载作用使混凝 土中一部分裂隙压实,同时也会产生新裂隙;当循环 荷载次数较小时,压实的裂隙来不及扩展贯通破坏, 混凝土微裂缝压实后强度提高,压实使内部孔隙率 减小黏性效应减弱。当循环荷载次数继续增加,裂 隙逐渐扩展贯穿,孔隙率升高,使强度降低。

3)由表 2 可得,经验公式(2)所拟合相关度 R<sup>2</sup> 都大于 0.95,说明一次函数可以较好的表达饱和混 凝土动态抗压强度增长因子与应变速率的关系。

# 2.2 峰值应变分析

本试验测得混凝土在不同循环荷载次数、不同 应变速率下的峰值应变数值见表 3。

表 3 历经循环荷载后饱和混凝土的峰值应变 Tab. 3 Peak strain of saturated concrete after mechanical cyclic loading

古亦诸玄/。		不同循环荷	载历史次数	¢
应受速举/s-	0次	25 次	50次	100次
$10^{-5}$	2.39	2.89	2.54	2.81
$10^{-4}$	2.68	2.91	2.50	2.48
$10^{-3}$	2.61	2.78	2.66	2.59
$10^{-2}$	3.02	2.95	2.76	3.14

由表3可得如下结论:

 1)饱和混凝土的峰值应变随应变速率增加大体呈增加的趋势。原因是较高应变速率时,混凝土 中微裂缝沿最短路径发展,且裂缝发展的数量也较少,故应变速率越高,混凝土变形越大。

2) 在中低应变速率(10<sup>-5</sup>~10<sup>-3</sup>/s)时,饱和混凝 土峰值应变随荷载循环次数增加总体呈先增大后减小 的趋势。可知循环荷载历史对混凝土峰值应变有一定 的影响,较低循环荷载历史可以提高混凝土的延性。

# 2.3 弹性模量分析

循环荷载后混凝土轴心抗压强度 35%~45% 时应力应变曲线的割线模量作为混凝土弹性模量的 代表值,其数学表达式为:

$$E = (\sigma_{0.45} - \sigma_{0.35}) / (\varepsilon_{0.45} - \varepsilon_{0.35})$$
(3)

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

本试验采用式(3)对数据计算饱和混凝土在不同 循环荷载次数、不同应变速率下的弹性模量,见表4。

表 4 历经循环荷载后饱和混凝土的弹性模量(单位:GPa) Tab. 4 Elastic modulus of saturated concrete after mechanical cyclic loading

<b>应</b> 亦 演 索 /。	-	不同循环荷	载历史次数	ίζ.
应文述平/8	0次	25 次	50次	100次
$10^{-5}$	21.05	23.58	22.28	21.98
$10^{-4}$	19.31	25.83	23.68	25.86
$10^{-3}$	24.52	26.44	25.27	25.52
$10^{-2}$	29.82	28.60	27.61	25.69

#### 由表4可得如下结论:

1) 饱和混凝土的弹性模量随应变速率的增大 整体上呈现出增大的趋势。分析认为,在高应变速 率下(如 10<sup>-2</sup>/s),裂缝直接穿过骨料选择最短路径 快速发展,故弹性模量相对于低应变速率偏高。

2) 在应变速率为 10<sup>-5</sup>~10<sup>-3</sup>/s下,混凝土的弹 性模量随循环荷载次数增大整体表现出先增大后减 小的趋势,在 25 次时达到最大值。当应变速率为 10<sup>-2</sup>/s时,混凝土弹性模量与循环荷载次数成反比。

#### 2.4 破坏形态与机制分析

#### 2.4.1 强度破坏机制分析

本试验在各应变速率破坏形态均为共轭斜面剪 切状态,与静态加载试验无显著区别。试件受压产 生横向拉应力使之膨胀,而试件承压面未进行减磨 处理,使试件两端受到摩擦约束。因此破坏形态为 倒锥形破坏形态。在低应变速率时,混凝土裂纹沿 着骨料与砂浆粘结面等强度较弱的区域缓慢发展, 粗骨料的性能没有完全发挥。而在较高应变速率 时,由于速率过大内部的裂纹直接穿过骨料并快速 发展,骨料将会被拉断而产生平直的断口,此时混凝 土破坏强度取决于骨料强度,而混凝土骨料的抗拉 强度比薄弱区大,所以混凝土峰值应力提高,与图 6 力学试验所得结论一致。图 9 是 10<sup>-5</sup>~10<sup>-2</sup>/s 应 变速率下试件破坏形态,可见,随着应变速率的增 加,混凝土破坏面的粉末较少,而骨料断裂数量明显 变多,且混凝土破坏形态成倒锥形。

#### 2.4.2 孔隙水压作用分析

饱和混凝土由于孔隙水压作用,初始试件内部 细微缝隙发展并使材料物理力学性能发生改变,如 强度降低,透水性增强等。黏性效应即为 Stefan 效 应<sup>[13]</sup>,其物理模型如图 10 所示,该模型可简化为两 个间距为 h 半径为 r 的平行圆盘,两者之间是黏性 系数为 η 的不可压缩流体,当两者以相对速度dh/dt 反向运动时,所产生粘聚力与拉应力分别为:

$$F = \frac{3\pi\eta r^4}{2h^3} \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

式中:η为流体的黏性系数;r 为圆盘半径;h 为圆盘 的间距;F 是圆盘分开时所需的外力。



图 9 50 次循环荷载后不同应变速率下破坏形态 Fig. 9 Failure modes of concrete at different strain rates after 50 cyclic loading



图 10 Stefan 效应示意图 Fig. 10 Sketch of Stefan effect

由式(4)和图(10)可知,水环境中工作的混凝 土,由于黏性效应影响,粘聚力F与液体的黏性系 数η和相对速度 dh/dt 成正比,液体对圆板的反作 用力与圆板的分离速度成正比。所以饱和混凝土开 裂时,孔隙中自由水引起的粘聚力F阻碍混凝土裂 纹开裂,从而使混凝土动态强度提升。尤其在高应 变速率时,黏性效应更为明显。

在低次数的循环加载历史情况下,混凝土的内 部缺陷和初始微裂纹经过机械循环挤压作用变得密 实,使混凝土强度得到提高。在高次数的循环加载 情况下,混凝土内部缺陷和微裂缝经过压实后,随着 循环荷载历史次数的继续增加,混凝土内部旧裂缝 持续发展的同时产生新的裂缝,使单调加载过程中 混凝土的峰值应力下降。

由图 7 可知应变速率相同时,峰值应力随循环 荷载次数出现先增大后减小的规律,在 50 次循环荷 载后达到峰值,随着次数继续增加峰值应力逐步降 低。产生此现象的原因是,当循环加载次数在 50 次 以内时,混凝土产生一定数量的微小裂缝,并充满自 由水,产生抑制裂缝扩展的粘聚力。随循环次数增 加,水环境中混凝土微裂缝逐渐增多,使黏性效应增强,表现出混凝土抗压强度增加。而随着循环加载 次数进一步增加,微裂缝逐步贯穿为宏观裂缝,并不 断扩展从而失去承载力。但此时混凝土仍有新的微 裂缝产生,从试验数据可得 100 次循环加载后抗压 强度仍然大于无初始损伤混凝土。进一步验证了水 环境中混凝土黏性效应作用。

# 3 混凝土损伤本构模型

混凝土受水化热影响,内部存在孔隙与微裂缝。 当荷载作用时,内部初始裂缝发展且裂缝发展方向 和荷载方向呈90°。较多的学者已经推导出了不同 的混凝土的损伤本构模型,而且模型各有差异。 Weibull 推导了以链条模型为基础的脆性破坏统计 理论。文献[14]运用 Weibull 统计理论能够比较合 适地模拟脆性材料的每个单元的强度规律。基于试 验数据,采用文献[14-15]的 Weibull-Lognormal 损 伤本构模型的混凝土应力-应变关系公式。对峰值 后建立的应力-应变关系为:

$$\sigma = a \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln\left(\frac{\varepsilon}{b}\right)}{t}\right]^2\right\}$$
(5)

边界条件为 $\epsilon = \epsilon_{pk}, d\sigma/d\epsilon = 0, \sigma = \sigma_{pk}, 对式(5)进行求$ 导得:

 $b = \varepsilon_{\rm pk}$ 

$$\frac{\mathrm{d}\sigma}{\mathrm{d}\varepsilon} = -a \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon}{b}\right)}{t^2 \varepsilon} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{\ln\left(\frac{\varepsilon}{b}\right)}{t}\right]^2\right\} \quad (6)$$

将边界条件代入式(6)得:

将边界条件及式(7)代入式(5)可得:

$$=\sigma_{\rm pk}$$
 (8)

即得峰值后的应力-应变关系:

$$\sigma = \sigma_{\rm pk} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\rm pk}}\right)}{t}\right]^2\right\}$$
(9)

运用应变等价原理,将公式代入变换得:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\tilde{E}} = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{(1-D)E} \tag{10}$$

即:

$$\sigma = E(1-D)\varepsilon \tag{11}$$

从而建立起损伤模型:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon \left\{ \exp\left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pk}}\right)^{m}\right] \right\}, & 0 \leqslant \varepsilon \leqslant \varepsilon_{pk} \\ \sigma_{pk} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pk}}\right)}{t}\right]^{2} \right\}, & \varepsilon \geqslant \varepsilon_{pk} \end{cases}$$
(12)

式中:E 为弹性模量; $\sigma_{pk}$ 为峰值应力; $\varepsilon_{pk}$ 为峰值应 变; $m=1/\ln(E\varepsilon_{pk}/\sigma_{pk})$ ,t需要通过对全曲线拟合后 得到,m和t为上升段和下降段的形状限制系数。 由式(12)对循环荷载 25次,50次,100次在应变速 率 10<sup>-5</sup>/s和10<sup>-3</sup>/s进行拟合分析。

图 11~16 中虚线为荷载位移曲线,红线为通过 式(12) 拟合的曲线。由图 11~16 可知,式(12) 可较 好地描述历经不同循环荷载历史后的混凝土在不同 应变速率下的应力应变全曲线,拟合程度较好。







图 12 25次循环 10<sup>-3</sup>/s 速率下试验与拟合对比图 Fig. 12 10<sup>-3</sup>/s rate 25 time cycle curve and curve comparison chart



图 13 50 次循环 10<sup>-5</sup>/s 速率下试验与拟合对比图 Fig. 13 10<sup>-5</sup>/s rate 50 time cycle curve and curve comparison chart



图 14 50 次循环 10<sup>-3</sup>/s 速率下试验与拟合对比图 Fig. 14 10<sup>-3</sup>/s rate 50 time cycle curve and curve comparison chart



图 15 100 次循环 10<sup>-5</sup>/s 速率下试验与拟合对比图 Fig. 15 10<sup>-5</sup>/s rate 100 time cycle curve and curve comparison chart



图 16 100 次循环 10<sup>-3</sup>/s 速率下试验与拟合对比图 Fig. 16 10<sup>-3</sup>/s rate 100 time cycle curve and curve comparison chart

# 4 结 论

本文对经历四种循环荷载后饱和混凝土进行了 四种应变速率下的单轴压缩试验研究,对材料力学 参数进行分析,并根据 Weibull-Lognormal 损伤本 构模型进行拟合并与试验数据进行对比。主要结论 如下。  1)饱和混凝土峰值应力随应变速率增大而增 大,随循环荷载次数增大出现先增大后减小的规律。
 峰值应变随循环荷载次数增大先增大后减小,随应 变速率增大总体呈增大趋势。弹性模量随应变速率 增大整体呈增大趋势。

2) 拟合曲线与试验数据进行对比, Weibull-Lognormal 损伤本构模型可较好的模拟历经循环荷载后不同应变速率下的损伤特性。

# 参考文献:

- [1] OSHITA H, TANABE T. Water migration phenomenon in concrete in prepeak region [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(6): 565-572.
- [2] BUTLER J E. The influence of pore pressure upon concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1981, 33 (114): 3-17.
- [3] IMRAN I, PANTAZOPOULOU S J. Experimental study of plain concrete under triaxial stress [J]. ACI Materials Journal, 1996, 93(6): 589-601.
- [4] 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 Hailong, LI Qingbin. Effect of pore water on the compressive strength of wet concrete [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10): 141-144.
- [5] 王海龙,李庆斌. 湿态混凝土抗压强度与本构关系的细 观力学分析 [J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(8): 1531-1536.

WANG Hailong, LI Qingbin. Mesomechanics analysis of compressive strength and constitutive equation of wet concrete [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1531-1536.

- [6] 刘军. 混凝土损伤分析及其工程应用 [D]. 大连: 大连 理工大学, 2004.
  LIU Jun. The damage analysis of concrete and its engineering application [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [7] 陈有亮,邵伟,周有成.水饱和混凝土单轴压缩弹塑性 损伤本构模型 [J].工程力学,2011,28(11):59-63.
  CHEN Youliang, SHAO Wei, ZHOU Youcheng.
  Elastoplastic damage constitutive model of water-saturated concrete under uniaxial compression [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(11): 59-63.
- [8] 白卫峰,陈健云,范书立.饱和混凝土单轴拉伸动态统 计损伤本构模型[J].防灾减灾工程学报,2009,29
   (1):16-21.

BAI Weifeng, CHEN Jianyun, FAN Shuli. The statistical dynamic damage constitutive model of saturated concrete under uniaxial tension [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009, 29(1): 16-21.

[9] 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 Weifeng, XIE Wei, GUAN Junfeng, et al. Influence of pore water pressure on compressive strength of concrete under complicated stress states [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(1): 24-30.

[10] 黄常玲,刘长武,高云端,等. 孔隙水压力条件下混凝 土的破坏机理 [J]. 四川大学学报:工程科学版, 2015,47(增刊2):76-80.
HUANG Changling, LIU Changwu, GAO Yunduan, et al. Failure mechanism of concrete under pore water pressure [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(2):76-80.

[11] 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. Dynamic strength and deformation of concrete in triaxial stress states [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24 (3): 58-64.

[12] 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 Gang, WANG Qianfeng, LIANG Chunhua.
Study on dynamic compressive properties of concrete

Study on dynamic compressive properties of concrete under pore water pressure environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 11-18.

- [13] 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 Qiaoping. Stochastic micro-viscous damage model for concrete based on the Stefan effect [J].
  Structure Engineers, 2013, 29(4), 31-37.
- [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 Chunlai, XU Bigen, LI Shulin, et al. Study on

a constitutive model of damage of SFRC under uniaxial compression [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (1): 151-154.

[15] 王乾峰. 钢纤维混凝土动态损伤特性研究 [D]. 宜昌: 三峡大学, 2009.

WANG Qianfeng. Investigation to dynamic damage behavior of steel fiber reinforced concrete [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2009.

(责任编辑 王绪迪)