

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.010

徐童淋, 彭刚, 杨乃鑫, 等. 混凝土冻融劣化后动态单轴抗压特性试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 69-78. (XU Tonglin, PENG Gang, YANG Naixin, et al. Experimental studies of dynamic uniaxial compressive properties of concrete after freeze-thaw deterioration[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(6): 69-78. (in Chinese))

混凝土冻融劣化后动态单轴抗压特性试验研究

徐童淋¹, 彭 刚^{1,2}, 杨乃鑫¹, 柳 琪¹

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 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)

摘要: 为研究混凝土冻融循环后的动态力学性能, 利用 10 MN 动静三轴仪对不同冻融劣化程度的混凝土在不同加载速率下进行单轴压缩试验, 同时采集声发射数据分析试验过程中能量释放及损伤演化规律。最后, 选用 Weibull-Lognormal 损伤本构模型, 对试验数据进行拟合分析, 并分析不同工况混凝土的损伤随应变的发展规律。研究结果表明: ①相同冻融劣化程度时, 随应变速率增加, 峰值应力增大, 峰值应变减小; 冻融劣化程度会影响峰值应力的率敏感性; ②在应变速率相同时, 随冻融循环次数增加, 峰值应力随之减小, 峰值应变随之增大。③混凝土冻融劣化后应力应变关系峰前服从 Weibull 统计分布, 峰后服从 Lognormal 统计分布。④在相同应变速率下, 随着冻融循环次数的增加, 混凝土的累计塑性应变整体呈增大趋势。

关 键 词: 混凝土; 冻融劣化; 动态抗压; 本构关系; 损伤

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2017)06-0069-10

混凝土的冻融破坏是影响耐久性的一个重要因素。我国的东北、华北属高寒地区, 其中很大一部分地区还位于高烈度地震区, 特殊的气候与复杂的地质条件对该地区的水工结构造成双重威胁。大批国内外学者对混凝土的冻融破坏进行了研究。Tedesco 等^[1]利用 SHPB 压杆, 在应变速率 $10^{-1}/s \sim 10^3/s$ 范围内对混凝土进行单轴压缩试验, 并得到应力应变曲线。肖诗云等^[2]对标准立方体进行了动态压缩试验, 得出了抗压强度增加系数与应变速率的对数近似呈线性关系。李金玉等^[3]采用快冻法研究饱和混凝土冻融破坏机理, 研究抗压、抗弯强度等力学参数, 试验探明混凝土冻融破坏是一个物理破坏过程, 不同种类混凝土的破坏机理不尽相同。宋玉普等^[4]对 C30 普通混凝土在不同次数冻融循环后进行试验研究, 得到抗压强度的比值与冻融循环次数之间的关系, 并建立了数学表达式。罗昕等^[5]采用超声波声速作为损伤变量对冻融循环后混凝土的损伤进行研究, 建立了冻融循环后混凝土的相对强度和相对超声波速之间的关系式。祝金鹏等^[6]采用快冻法对混凝土进行了 100, 200, 300 次冻融循环后的动静态压缩试验, 构建了强度以及弹性模量的折减模型。曹大富等^[7]通过快冻法, 进行混凝土受压试验, 分析冻融次数、混凝土等级、相对动弹性模量对混凝土受压性能的影响。王海涛等^[8]对全级配混凝土进行不同冻融循环次数与应变速率单轴动态抗压试验。建立了考虑冻融循环次数与应变速率影响的统一破坏准则。

基于上述文献, 大量研究主要集中于质量损失和相对动弹性模量, 研究混凝土抗冻性原理。而混凝土冻融劣化后力学性能的试验研究比较少见, 且上述文献多数采用湿筛除去大于 40 mm 粗骨料制作标准立方体的试件, 湿筛后混凝土相对于真实大体积混凝土其骨料比例与结构都有所不同, 并不能准确反映实际筑坝混凝土的力学性能。为此, 本文对 C30 二级配混凝土历经不同次数冻融循环, 在不同应变速率下进行单轴压

收稿日期: 2016-12-29

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(1990—), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事混凝土材料动力特性与结构抗震研究。E-mail: xutonglin61@163.com 通信作者: 彭 刚(E-mail: gpeng158@126.com)

缩试验,每个工况保证 3 组有效试验数据。着重研究静载与地震作用应变速率响应范围($10^{-5}/s \sim 10^{-2}/s$),开展混凝土在环境作用下(冻融环境)动力学性能试验,将混凝土动力特性与耐久性相结合,比较不同冻融劣化程度、不同加载速率的动态性能;对比分析劣化混凝土与常态混凝土、动静态之间材料性能差异,并探索其动静态本构的差异与损伤演化规律。

1 试验设计

1.1 试件制备

试验制备强度等级 C30 二级配混凝土,因试验使用设备尺度和出力都很大,故采用 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的方样,制备采用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;饮用水搅拌;粗骨料为粒径范围 $5 \sim 30\text{ mm}$ 连续级配的碎石;细骨料为人工砂,连续级配,细度模数为 1.8。混凝土配合比如下:粗骨料:细骨料:水:水泥 = 2.55:1.70:0.60:1.00,水灰比 0.6。

试件浇筑完成后,在标准条件下养护 28 d 后取出。根据 GB/T 50082—2012《普通混凝土长期性和耐久性试验方法》^[9]进行饱和处理,由于本试验所研究的试件尺寸较大,浸泡时间为 14 d,经反复称重后质量不增加,即认为充分饱和。此后利用 TR-TSDRSL 冻融仪进行冻融循环处理。达到预定的冻融循环次数后,剔除不满足规范^[9]要求的试件,即质量损失率大于 5%的试件。不同冻融循环后试件表面如图 1 所示。为避免出现偏心受压以及应力集中,对冻融后试件表面进行砂浆抹平处理。

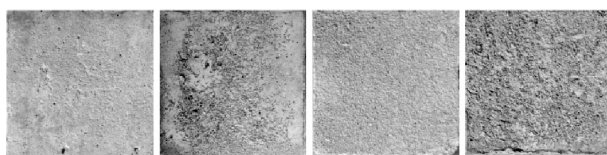


图 1 不同次数冻融循环后混凝土表面

Fig. 1 Concrete surface after freeze-thaw deterioration

1.2 试验设备与过程

试验采用 10 MN 多功能动静力三轴仪。竖向最大动、静力加载值可达到 5 000 和 10 000 kN,应变速率响应值可达到 $10^{-2}/s$ 。冻融试验系统可按照规范^[9]要求制备试验所需试件。声发射系统包括传感器、前置放大器及采集卡,如图 2 所示。传感器将接收到的机械振动转化为电信号,前置放大器可将声发射源微弱信号放大并避免在传输过程中失真。SAEU2S 采集箱可提取声发射波形数据和参数,对数据进行分析处理。



(a) 10 MN 多功能动静力三轴仪



(b) TR-TSDRSL 冻融仪



(c) 传感器



(d) 前置放大器



(e) SAEU2S 声发射主机箱

图 2 主要试验设备

Fig. 2 Main experimental instruments

试验步骤如下:①装样后安装并检查变形计与声发射装置。②预加载,先以 30 mm/min 速度用位移控制将油缸上升至试件与传力柱即将接触,再采用移动转换控制命令以 5 mm/min 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。③正式加载,按已设置好的加载程序指令进行加载并采集声发射数据。正式加载结束的同时停止声发射数据采集并保存正式加载声发射数据。依据《水工混凝土试验规程》^[10]对试件进行一次性动态单轴抗压试验(按照 5 种应变速率 $10^{-5}/s, 5 \times 10^{-5}/s, 10^{-4}/s, 5 \times 10^{-4}/s, 10^{-3}/s$)单调加载直到试件破坏。④试验结束,保存数据,卸载,关闭控制器和油压系统,拍照并清理残渣。

2 混凝土冻融劣化后基本力学参数分析

2.1 混凝土质量损失分析

混凝土冻融后质量损失是混凝土抗冻性指标之一。达到预定冻融次数后,对同批次多个试件称重后取平均值,得到冻融劣化后混凝土质量损失如表1所示。

表1 冻融劣化后试件质量损失

Tab. 1 Mass loss of specimens after freeze-thaw deterioration								
冻融循环次数/次	0	10	20	25	30	35	40	50
平均质量/kg	65.77	65.95	65.96	65.86	65.80	65.71	65.29	65.28
质量损失/%	0	-0.274	-0.289	-0.137	-0.045	0.091	0.730	0.745

对混凝土冻融后质量损失率与冻融循环次数的关系,进行二次拟合,计算式如下:

$$M(N) = A_1N + B_1N^2 \quad (1)$$

式中: $M(N)$ 为历经 N 次冻融循环后质量损失; N 为冻融循环次数; A_1, B_1 为拟合参数与材料有关。拟合参数为 $A_1 = -0.051\ 39, B_1 = 0.001\ 71, R^2 = 0.978\ 44$,拟合效果如图3所示。

根据图3的拟合结果,质量损失与冻融循环次数之间的变化规律可以用式(2)描述:

$$M(N) = -0.053\ 9N + 0.001\ 8N^2 \quad (2)$$

计算式(2)拟合相关度 R^2 为0.96,可较好地表达混凝土冻融后质量损失与冻融循环次数的关系。随着冻融次数增加,质量损失率先减小后增大,约在10~20次出现极值点。在35次后质量损失率急剧增大。

本试验质量损失率与冻融循环次数的关系为有极值点的二次函数关系,而文献[8]中则为单调增加的二次函数关系。分析认为,本试验采用的普通二级配混凝土在不添加外加剂(如引气剂,防冻剂)情况下质量变化主要受裂缝冻胀吸水和冻胀骨料剥落两方面影响。在冻融初期,混凝土裂缝扩展,吸水率增大,而此时试件表面砂浆只有少量剥落,因此混凝土试件质量增大。随冻融次数增多,砂浆与骨料剥落逐渐增多,在35次冻融循环后质量损失率急剧增长。混凝土材料骨料与裂缝扩展具有随机性,并不一定存在固定极小值点,可认为10~20次之间存在临界点。而文献[8]中,试件浇筑时添加引气剂,能显著提高混凝土的抗渗性与抗冻性,冻融过程中,质量损失由冻胀骨料剥落占主导作用,故质量损失率为单调增加的二次函数关系。

2.2 混凝土峰值应力分析

混凝土历经不同冻融劣化程度,在不同加载速率下试验所测峰值应力如表2所示。峰值应力和应变速率与冻融循环次数的关系如图4~5。

表2 不同冻融循环次数不同加载速率下的峰值应力

Tab. 2 Peak stress with different strain rates and freeze-thaw cycles						MPa
冻融循环次数/次	应变速率/ s^{-1}					
	10^{-5}	5×10^{-5}	10^{-4}	5×10^{-4}	10^{-3}	
0	41.56	43.97(5.79%)	46.40(11.65%)	48.92(17.66%)	50.43(21.27%)	
10	—	—	36.33	41.80	—	
25	25.68	27.91(8.68%)	29.31(14.14%)	29.50(14.87%)	31.13(21.22%)	
35	—	—	22.57	25.47	—	
50	21.62	22.50(4.07%)	23.72(9.71%)	24.04(11.19%)	25.09(16.05%)	

注:()中数值为不同应变速率下的峰值应力较应变速率为 $10^{-5}/s$ 峰值应力的增长率。

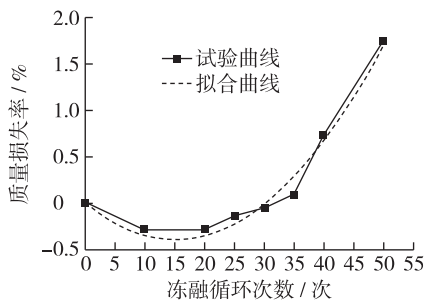


图3 质量损失与冻融循环次数的关系

Fig. 3 Mass loss with number of freeze-thaw cycles

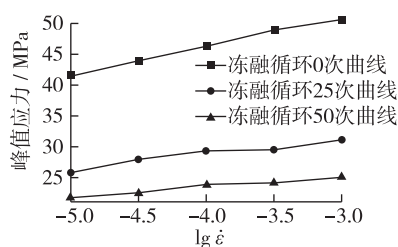


图 4 峰值应力与加载速率之间的关系
Fig. 4 Change of peak stress with strain rate

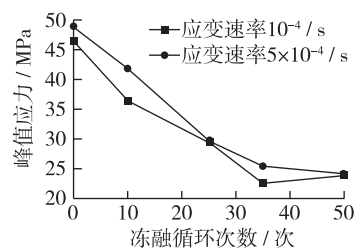


图 5 峰值应力与冻融次数之间的关系
Fig. 5 Change of peak stress with number of freeze-thaw cycles

由表 3 和图 4~5 可得如下结论:在相同冻融劣化程度,峰值应力随加载速率的升高而增大。随冻融循环次数增多,在应变速率相同时,冻融次数增多会使峰值应力逐渐降低,如图 5 当冻融循环 50 次后,峰值应力衰减为未经过冻融混凝土峰值应力的 50%。

由图 4 可知,抗压强度与应变速率的增幅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^[11]。

$$f_c/f_{cs} = \alpha \lg(\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{cs}) + 1 \quad (3)$$

式中: f_c/f_{cs} 为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_{cs} 为准静态应变速率下的抗压强度; $\dot{\epsilon}_c$ 为当前的应变速率; $\dot{\epsilon}_{cs}$ 为准静态应变速率,取为 $10^{-5}/s$; α 为材料参数,通过试验数据拟合得出。拟合效果如图 6 所示,拟合参数如表 3 所示。由图 6 和表 3 可知一次函数能够较好反应二者之间的变化趋势,相关系数均在 0.95 以上。

随着冻融劣化程度的加深,拟合曲线的斜率降低,冻融劣化会降低混凝土率敏感性。试件在反复冻胀后,材料产生较大损伤,微裂纹继续扩大,在压缩状态下,水的楔入作用增强,因此,冻融 50 次拟合曲线的斜率增长缓慢。

如图 7 所示,在应变速率相同时,随着冻融劣化程度的加深,混凝土的峰值应力衰减较快;当冻融循环次数高于 25 时,峰值应力衰减速度逐渐平缓。对试验数据利用式(4)进行二次拟合:

$$f_c^N/f_c^0 = A_2 N^2 + B_2 N + C_2 \quad (4)$$

式中: f_c^N 为 N 次冻融循环后混凝土峰值应力; f_c^0 为水饱和混凝土在应变速率为 $10^{-5}/s$ 时峰值应力; A_2, B_2, C_2 为拟合材料参数(表 4),两者间的相关系数均为 0.99,能够反应两者之间的关系。

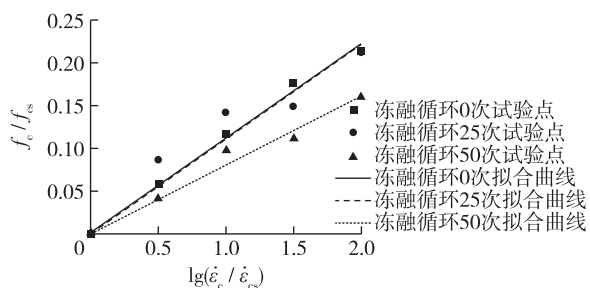


图 6 峰值应力增量与相对应变速率拟合
Fig. 6 Fitting graph of peak stress increment with strain rate

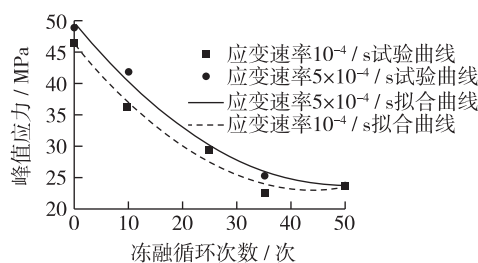


图 7 峰值应力与冻融循环次数拟合
Fig. 7 Fitting graph of peak stress with number of freeze-thaw cycles

表 3 峰值应力增长因子与相对加载速率的拟合参数

Tab. 3 Compressive strength growth factor fitting parameter

冻融循环次数/次	a_1	R^2
0	0.104 7	0.989 7
25	0.103 9	0.956 3
50	0.076 0	0.968 7

由图7和表4可得如下结论:

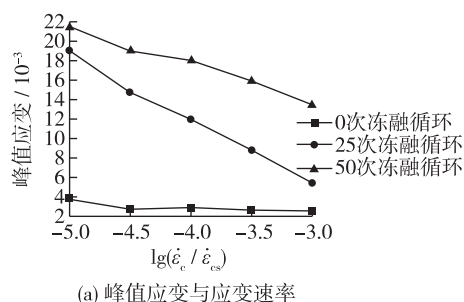
(1)随着冻融劣化程度加深,混凝土内部孔隙水向毛细微裂纹扩散的时间减少,楔入作用减弱,黏滞性增强,因此随着冻融次数增加,峰值应力减小的速度逐渐变慢。

(2)本试验所用素混凝土未加入引气剂和减水剂,导致混凝土的致密性较差,强度衰减较快,抗冻性不良。

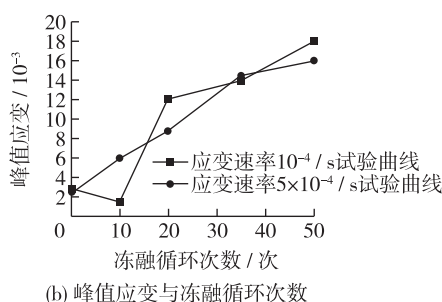
2.3 混凝土峰值应变分析

峰值应力点处的应变为峰值应变。试验获得不同冻融循环次数与应变速率下的峰值应变如表5所示,峰值应变随加载速率与冻融循环次数的变化见图8。

由表5与图8(a)可得,在相同程度冻融劣化时,峰值应变随应变速率增加整体呈减小趋势。0次和50次冻融循环后混凝土峰值应变随应变速率的增加相对减小比较缓慢,然而25次冻融循环曲线却比较陡峭。当应变速率较低时,混凝土裂缝扩展先由砂浆面等薄弱区域发展直到形成贯通裂缝;随应变速率增大,裂缝穿透粗骨料破坏,破坏路径变短,因此混凝土变形会减小。由图8(b)可知,随冻融循环次数增加,峰值应变增大。



(a) 峰值应变与应变速率



(b) 峰值应变与冻融循环次数

图8 峰值应变随加载速率与冻融循环次数的变化

Fig. 8 Change of peak strain with strain rate and number of freeze-thaw cycles

从图8(a)可知峰值应变与应变速率对数间变化规律为线性递减,按照式(5)进行拟合,拟合效果如图9所示,拟合参数如表6所示。

$$\varepsilon_{pk}/\varepsilon_c = \beta \lg(\dot{\varepsilon}_c/\dot{\varepsilon}_{cs}) + 1 \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_{pk}/\varepsilon_c$ 为峰值应变衰减因子, ε_{pk} 为当前应变速率下峰值应力处对应的应变值, ε_c 为准静态下峰值应力处所对应的应变值; β 为材料拟合参数,通过对试验数据拟合得出。

根据图9和表6可知,两者之间的线性关系较好,具有较强的相关性。

应变速率相同时,峰值应变随冻融循环次数整体呈线性增加,对混凝土峰值应变与冻融循环次数之间的关系进行拟合,拟合式如下,拟合曲线如图10所示。

$$\varepsilon_{pk} = A_3 N + B_3 \quad (6)$$

式中: A_3, B_3 为材料参数。

表4 峰值应力与冻融循环次数间的拟合参数

Tab. 4 Fitting parameters for peak stress and number of freeze-thaw cycles

应变速率/ s^{-1}	A_2	B_2	C_2	R^2
10^{-4}	0.000 3	-0.025 0	1.112 9	0.992 1
5×10^{-4}	0.000 3	-0.025 3	1.196 2	0.996 2

表5 不同冻融循环次数和应变速率下的峰值应变

Tab. 5 Peak strains under different strain rates and number of freeze-thaw cycles

冻融循环次数/次	应变速率/ s^{-1}				
	10^{-5}	5×10^{-5}	10^{-4}	5×10^{-4}	10^{-3}
0	3.823	2.710	2.850	2.583	2.491
10	-	-	1.480	5.960	-
25	19.077	14.719	11.960	8.789	5.423
35	-	-	13.957	14.405	-
50	21.620	18.985	17.957	15.957	13.502

表6 混凝土峰值应变衰减因子与加载速率的拟合参数

Tab. 6 Fitting parameters of the peak strain decrease factor and strain rate

冻融循环次数/次	β	R^2
0	-0.211 2	0.982 1
25	-0.365 9	0.993 8
50	-0.184 4	0.988 3

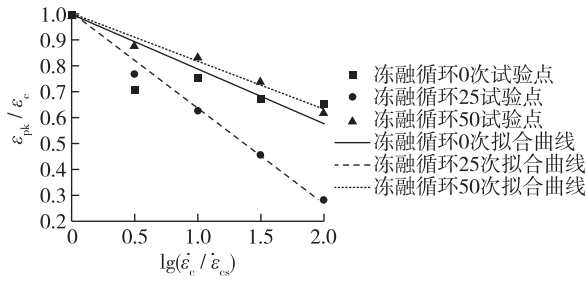


图 9 混凝土峰值应变衰减因子与加载速率的关系

Fig. 9 Relationship between peak strain decrease factor and strain rate

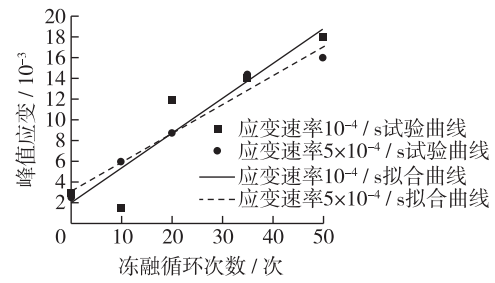


图 10 峰值应变与冻融循环次数之间的拟合关系

Fig. 10 Fitting graph of peak strain and number of freeze-thaw cycles

经拟合,应变速率为 $10^{-4}/\text{s}$ 时, $A_3 = 0.302\ 2$, $B_3 = 3.370\ 1$, $R^2 = 0.993\ 4$; 应变速率为 $5 \times 10^{-4}/\text{s}$ 时, $A_3 = 0.278\ 1$, $B_3 = 2.863\ 2$, $R^2 = 0.979\ 4$ 。可见,式(6)能够较好地反应两者之间的关系。混凝土冻融后,在冻胀反复作用下使孔隙逐渐增大,体积也略微增大,致密性降低。此时进行单轴压缩试验,混凝土先历经压密实这一过程,因此混凝土的峰值应变会增大,延性也随之增强。

3 混凝土损伤本构模型

3.1 冻融劣化后应力-应变曲线研究

为得出混凝土在动态加载状态下的本构关系。王春来等^[12]根据 Weibull 统计分布理论和等效应变假定,推导出钢纤维混凝土损伤本构模型。文献[13]基于 Weibull 强度理论推广至冻融后混凝土,并对试验结果进行拟合分析,应力-应变曲线峰前拟合效果良好。文献[14]指出用 Weibull 统计分布不能准确描述峰后应力-应变关系,并对下降段采用 Lognormal 统计分布规律描述改进后的混凝土应力-应变关系。

文献[14]对峰后建立应力-应变关系为:

$$\sigma = a \exp \left(- \frac{1}{2} \left(\frac{\ln \left(\frac{\varepsilon}{b} \right)}{t} \right)^2 \right) \quad (7)$$

边界条件为 $\varepsilon = \varepsilon_{pk}$, $d\sigma/d\varepsilon = 0$, $\varepsilon = \varepsilon_{pk}$, $\sigma = \sigma_{pk}$, 对式(7)求导得:

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = -a \frac{\ln \left(\frac{\varepsilon}{b} \right)}{t^2 \varepsilon} \exp \left(- \frac{1}{2} \left(\frac{\ln \left(\frac{\varepsilon}{b} \right)}{t} \right)^2 \right) \quad (8)$$

将相应的已知条件代入式(8)得:

$$a = \sigma_{pk}, b = \varepsilon_{pk} \quad (9)$$

则峰值后的应力-应变关系为:

$$\sigma = \sigma_{pk} \exp \left(- \frac{1}{2} \left(\frac{\ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pk}} \right)}{t} \right)^2 \right) \quad (10)$$

根据 Lemaitre^[15]的应变等价原理,应力作用在受损材料上引起的应变与有效应力作用在无损材料上引起的应变等价。据此可得:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\tilde{E}} = \frac{\tilde{\sigma}}{E} = \frac{\sigma}{(1-D)E} \quad (11)$$

即:

$$\sigma = E(1-D)\varepsilon \quad (12)$$

建立如下损伤模型:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon \left\{ \exp \left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pk}} \right)^m \right] \right\} & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{pk} \\ \sigma_{pk} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\ln \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pk}} \right) / t \right)^2 \right) & \varepsilon \geq \varepsilon_{pk} \end{cases} \quad (13)$$

$$D = \begin{cases} 1 - \exp \left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{pk}} \right)^m \right] & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{pk} \\ 1 - \frac{\sigma_{pk}}{E\varepsilon} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(\varepsilon/\varepsilon_{pk})}{t} \right)^2 \right) & \varepsilon \geq \varepsilon_{pk} \end{cases} \quad (14)$$

式中: E 为弹性模量; σ_{pk} 为峰值应力; ε_{pk} 为峰值应变; $m = 1/\ln(E\varepsilon_{pk}/\sigma_{pk})$ 是上升段形状控制参数,通过对全曲线拟合后得到; t 为下降段的形状限制系数。

采用式(13)对冻融循环 50 次在应变速率 $10^{-5}/s$ 和 $10^{-3}/s$ 进行拟合分析(见图 11)。由图 11 可知,拟合曲线与试验所得初始荷载位移曲线吻合良好,损伤演化方程可较精确地描述冻融劣化后不同应变速率下的应力-应变全曲线。

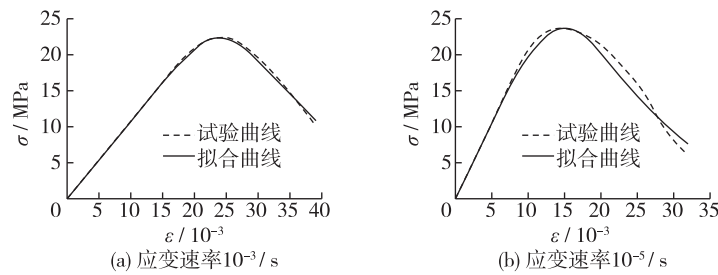


图 11 冻融循环 50 次时应力-应变关系试验曲线和拟合曲线对比

Fig. 11 Comparison between test and fitting curves of stress-strain relationship under 50 freeze-thaw cycles

为描述不同应变速率与不同冻融劣化程度对拟合曲线的影响,将各工况拟合曲线放同一坐标系下,如图 12~13 所示。在相同应变速率下(以 $10^{-4}/s$ 为例),混凝土强度随冻融劣化程度的加深而衰减。当冻融循环次数小于 10 次时,强度衰减较慢,此时冻融循环对混凝土的影响较小;当冻融循环次数大于 10 次时,混凝土强度迅速衰减,而混凝土延性则随之增加。在冻融程度相同时,混凝土强度随应变速率整体呈上升趋势,峰值应变随应变速率整体呈下降趋势。与力学参数分析所得结论相同。与未经冻融劣化混凝土的变化规律一致,说明混凝土材料力学特性虽具有离散型,仍满足统计学规律。

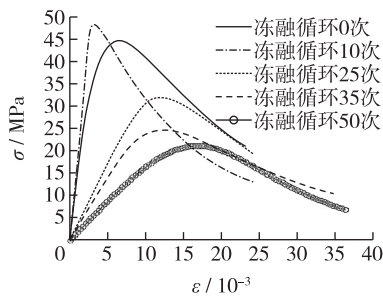


图 12 应变速率 $10^{-4}/s$ 时不同冻融循环次数下拟合曲线对比

Fig. 12 Comparison of fitting curves under different freeze-thaw times at strain rate of $10^{-4}/s$

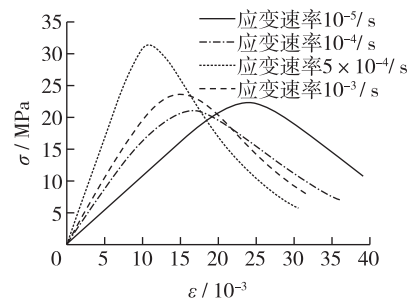


图 13 冻融循环 50 次时不同应变速率下拟合曲线对比

Fig. 13 Comparison of fitting curves under 50 freeze-thaw cycles at different strain rates

3.2 损伤变量分析

混凝土加载直到破坏中伴随着能量的变化,基于声发射检测与式(14)对损伤特性对比分析,本文选用能量数和累计能量数作为研究对象。将当前声发射累积能量 N 与最终破坏时总的累积能量 $N_m^{[15]}$ 之比定义为损伤变量 $D^{[16]}$ 。Tang 等^[17]将声发射与连续损伤力学的方法相结合,认为损伤变量与声发射累计数变化规律具有一致性,如式(15)所示:

$$D = N/N_m \quad (15)$$

通过数据采集软件得到应变与时间关系曲线,利用 SAEU2S 声发射系统获取该时刻累计能量值,根据式(15)计算损伤变量值并建立损伤变量与累计塑性应变间的关系,如图 14(a)所示。同时利用式(14)计算混凝土的损伤变量,得到在相同应变速率下,不同冻融循环次数的混凝土的损伤随着应变的发展规律如图 14(b)所示。

由图 14(a)可知,基于声发射在相同应变速率下,不同冻融循环次数下的损伤变化规律相似,损伤曲线的斜率随着冻融循环次数增加呈先减小后增大趋势,当混凝土多次冻融循环后,内部微裂纹已经开始发展,孔隙增大,致密性减弱,在受压过程须经历压实致密阶段。含水量增加,黏滞作用阻碍了损伤的发展;这与力学参数中峰值应变与冻融循环次数的关系分析结论相吻合。由图 14(b)可知,相同应变速率时,混凝土的损伤随着应变的增加先缓慢增长,随后迅速增加,最后趋于平缓与文献[18]岩石三轴压缩结论相近。当冻融循环次数小于 10 次时,损伤随应变迅速增加,随着冻融劣化程度加深,损伤随应变增加缓慢,冻融 50 次混凝土损伤随应变增加最缓慢。

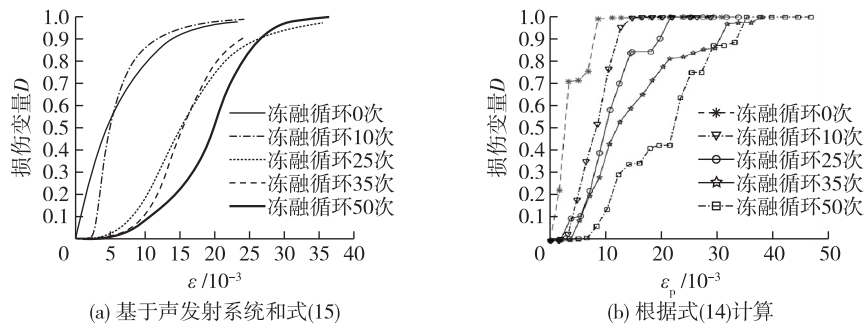


图 14 应变速率 $10^{-3}/s$ 时不同冻融循环次数下混凝土损伤发展情况

Fig. 14 Development of concrete damage at $10^{-3}/s$ strain rate under different freeze-thaw cycles

4 结 语

本文对混凝土经历不同冻融循环次数后进行了静态 ($10^{-5}/s$) 和中应变速率 ($10^{-4}/s \sim 10^{-3}/s$) 范围内的单轴压缩试验,分析动态力学性能,对其动态强度和变形进行了研究,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) 混凝土质量损失率与冻融循环次数可以用开口向上且过原点的抛物线描述;冻融劣化程度相同时,随应变速率增加,峰值应力增长因子随之增大。峰值应变衰减因子随之减小;冻融劣化程度和加载速率会影响混凝土的率敏感性。在同一应变速率下,随冻融循环次数增加,峰值应力减小;峰值应变增大。

(2) 历经冻融循环后的混凝土在单轴应力-应变全曲线用上述分段的统计分布函数来描述,效果较为理想。因此,可以将非冻融循环的混凝土的应力应变全曲线推广到冻融循环混凝土。混凝土损伤变量随着累计塑性应变增加先缓慢增加,随后迅速增长,最后趋于平缓。分析不同冻融劣化程度、可将混凝土单轴压缩损伤过程分为 3 个阶段:损伤起始阶段、损伤稳定发展阶段、损伤破坏阶段。

参 考 文 献:

- [1] TEDESCO J W, POWELL J C, ROSS C A, et al. A strain-rate-dependent concrete material model for ADINA[J]. Computer & Structures, 1997, 64(5/6): 1053-1067.
- [2] 肖诗云, 张剑. 不同应变率下混凝土受压损伤试验研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(3): 40-45. (XIAO Shiyun, ZHANG Jian. Compressive damage experiment of concrete at different strain rates[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3): 40-45. (in Chinese))
- [3] 李金玉, 曹建国, 徐文雨, 等. 混凝土冻融破坏机理的研究[J]. 水利学报, 1999, 34(1): 41-49. (LI Jinyu, CAO Jianguo, XU Wenyu, et al. Study on the mechanism of concrete destruction under frost action[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 34(1): 41-49. (in Chinese))
- [4] 宋玉普, 覃丽坤, 张众, 等. 冻融循环后混凝土双轴压的试验研究[J]. 水利学报, 2004(1): 95-99. (SONG Yupu, QIN Likun, ZHANG Zhong, et al. Experimental study on concrete behavior under biaxial compression after freezing and thawing cycle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(1): 95-99. (in Chinese))
- [5] 罗昕, 卫军. 冻融条件下混凝土损伤演变与强度相关性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 98-100. (LUO Xin, WEI Jun. The correlation between concrete strength and damage evolution in freeze-thaw cycles[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science Edition), 2006, 34(1): 98-100. (in Chinese))
- [6] 祝金鹏, 李术才, 刘宪波, 等. 冻融环境下混凝土力学性能退化模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(1): 62-67. (ZHU Jinpeng, LI Shucai, LIU Xianbo, et al. Mechanical property deterioration model for concrete in environment with freezing-thawing[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(1): 62-67. (in Chinese))
- [7] 曹大富, 富立志, 杨中伟, 等. 冻融循环作用下混凝土受压本构特征研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 17-23, 32. (CAO Dafu, FU Lizhi, YANG Zhongwei, et al. Study on constitutive relations of compressed concrete subjected to action of freezing-thawing cycle[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 17-23, 32. (in Chinese))
- [8] 王海涛, 范文晓, 刘天云, 等. 全级配混凝土冻融循环后单轴动态抗压性能试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(6): 732-738. (WANG Haitao, FAN Wenxiao, LIU Tianyun, et al. Experimental study on properties of fully-graded concrete under uniaxial dynamic compressive stress state after freezing-thawing cycles[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(6): 732-738. (in Chinese))
- [9] GB/T 50082—2009 普通混凝土长久性和耐久性试验方法[S]. (GB/T 50082—2009 Standard for test method of long-term performance and durability of ordinary concrete[S]. (in Chinese))
- [10] SL 352—2006 水工混凝土试验规程[S]. (SL 352—2006 Test code for hydraulic concrete[S]. (in Chinese))
- [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. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] 关虢, 牛荻涛, 王家滨, 等. 基于Weibull强度理论的混凝土冻融损伤本构模型研究[J]. 混凝土, 2015(5): 5-9, 13. (GUAN Xiao, NIU Ditao, WANG Jiabin, et al. Study of the freezing-thawing damage constitutive model of concrete based on Weibull's strength theory[J]. Concrete, 2015(5): 5-9, 13. (in Chinese))
- [14] 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 under pore water pressure environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 11-18. (in Chinese))
- [15] LEMAITRE J. Local approach of fracture[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 25(5/6): 523-537.
- [16] 张明, 李仲奎, 杨强, 等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2493-2501. (ZHANG Ming, LI Zhongkui, YANG Qiang, et al. A damage model and statistical analysis of acoustic emission for Quasi-Brittle materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2493-2501. (in Chinese))
- [17] TANG C A, XU X H. Evolution and propagation of material defects and Kaiser effect function[J]. Journal of Seismological Research, 1990, 13(2): 203-213.

- [18] 杨永杰, 王德超, 郭明福, 等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 98-104. (YANG Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 98-104. (in Chinese))

Experimental studies of dynamic uniaxial compressive properties of concrete after freeze-thaw deterioration

XU Tonglin¹, PENG Gang^{1,2}, YANG Naixin¹, LIU Qi¹

(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 concrete after freeze-thaw deterioration, the uniaxial compression tests of concrete specimens with varied freeze-thaw deterioration degrees are carried out by 10 MN triaxial static-dynamic instrument under different loading rates. The laws of the energy release and the damage evolution are analyzed by using acoustic emission. The damage development patterns of concrete with the strain under different load combinations are studied based on the Weibull-Lognormal damage constitutive model and its fitting experimental results. The results show that: ① For the concrete specimens with the same freeze-thaw deterioration degree, the peak stress increases with the increase of the strain rate, while the peak strain decreases. It indicates that the freeze-thaw deterioration degrees have influences on the sensitivity of the peak stress. ② For the concrete specimens with the same strain rate, the peak stress decreases with the increase of the number of freeze-thaw cycles, while the peak strain increases. ③ The stress-strain relationship of the concrete specimens after freeze-thaw deterioration is subjected to follow Weibull statistical distribution before the peak stress, and follow Lognormal statistical distribution after the peak stress. ④ For the concrete specimens with the same strain rate, the accumulative plastic strain of concrete generally increases with the increase of the number of freeze-thaw cycles.

Key words: concrete; freeze-thaw deterioration; dynamic compression test; constitutive relation; damage