DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.005

刘博文,彭刚,王孝政,等.不同冻融循环次数混凝土单轴压缩试验[J].水利水运工程学报,2017(1):32-36. (LIU Bowen, PENG Gang, WANG Xiaozheng, et al. Experimental studies on dynamic properties of concrete under different freeze-thaw cycles[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(1): 32-36. (in Chinese))

# 不同冻融循环次数混凝土单轴压缩试验

刘博文,彭 刚,王孝政,马小亮,邓 媛

(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:**为研究冻融循环作用对混凝土力学性能的不利影响,分别对混凝土进行 0,10,25,35 和 50 次快速冻融 循环,并利用 10 MN 大型多功能动静力三轴仪对混凝土历经 40%f<sub>e</sub>的荷载历史作用后(f<sub>e</sub>=40 MPa 为普通混凝 土单轴抗压强度),以 10<sup>-4</sup>/s 的应变速率进行单轴压缩试验,得到冻融循环后混凝土的单轴抗压强度,并分析其 损伤演化规律与破坏机理。结果表明:随着冻融循环次数的增加,历经相同加载历史作用后的混凝土的单轴抗 压强度逐渐降低,且峰值应力随冻融循环次数的变化呈二次曲线关系;选用修正后的 Weibull-Lognormal 分段式 损伤本构模型,经验证能够较好拟合冻融劣化混凝土历经荷载历史作用后单轴应力应变曲线;此外,冻融循环 次数越多,对混凝土造成的损伤程度越大,在损伤发展的后期阶段,冻融程度较大的混凝土损伤路径大幅度延 长且趋于扁平化,直至进入破坏阶段。

**关 键 词:**混凝土; 冻融循环; 荷载历史; 损伤本构模型 中图分类号: TV431 **文献标志码:** A **文章编号:**1009-640X(2017)01-0032-05

调查资料表明,东北、西北和华北地区修建的水工混凝土建筑物都遭受了局部或大面积不同程度的冻融 破坏,同时我国又是一个多地震国家,这些混凝土结构在遭遇动态荷载破坏时往往都承受了一定的荷载历 史。所以,研究冻融劣化混凝土在历经荷载历史后的动态力学性能,为提高高寒地区水工混凝土建筑物抗震 安全的认知水平和预判能力提供一定的理论基础和试验依据,具有较大现实意义。

混凝土的抗冻性能是其耐久性的重要指标之一,国内外学者对冻融循环后混凝土的动态力学性能开展 了大量研究,尹有君<sup>[1]</sup>对混凝土试件进行了不同冻融循环次数后的单轴抗压试验,分析了湿筛大骨料混凝 土试件强度降低幅度与冻融循环次数的关系,构建抗压强度与循环次数的数学模型并建立破坏准则;覃丽坤 等<sup>[2]</sup>试验得出随冻融循环次数的增加,海水中引气混凝土的单轴强度逐渐降低,并具有一定规律性的结论; 田威等<sup>[3]</sup>通过单轴加载试验得到冻融循环次数达到 120次时混凝土强度已下降到 60%,同时随着冻融循环 次数的增加,峰值点荷载会不断降低,相应的峰值位移显著增大的规律;Suzuki 等<sup>[4]</sup>通过 X 射线扫描冻融混 凝土,从细观上说明混凝土材料在冻融循环作用下的损伤机理;徐超<sup>[5]</sup>、肖诗云等<sup>[6]</sup>进行了历经加载历史的 混凝土率效应研究并构建损伤本构模型;宋玉普等<sup>[7]</sup>试验得出随冻融次数增加全级配混凝土与湿筛混凝土 的抗压强度与抗拉强度均明显降低,但全级配混凝土的降低值较湿筛混凝土的降低值大。覃丽坤等<sup>[8]</sup>分析 了冻融循环对混凝土单轴压及多轴压强度的不同影响,总结了应力比和冻融循环次数对处于多轴应力状态 下混凝土强度的影响规律。张连英等<sup>[9]</sup>结合冻融循环下混凝土单轴压缩试验数据,以强度的变化定义损 伤,建立了冻融循环作用下不同强度等级混凝土试块的损伤演化方程。以上研究对冻融劣化混凝土在简单

收稿日期: 2016-03-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51579139);三峡大学硕士学位论文培优基金资助项目(CX2015025)

作者简介:刘博文(1992—),男,湖北宜昌人,硕士研究生,主要从事混凝土材料动态特性研究。

E-mail: 1696327945@qq.com 通信作者:彭 刚(E-mail: gpeng@163.com)

应力状态和复杂应力状态下的基本力学特性研究方面已提出了一些成果,但对历经荷载历史作用后冻融混凝土动态特性特别是动态损伤特性的影响研究还较少。鉴于此,本文考虑5种冻融循环次数的影响,对历经单调加载历史后的混凝土进行动态单轴压缩试验,分析冻融劣化对混凝土材料动态强度的影响并结合混凝 土损伤规律构建相应的动态本构模型。

1 试验设计

#### 1.1 试件制备与快速冻融试验

试验采用边长为 300 mm 的立方体混凝土试件,水灰比为 0.6,水泥采用宜昌三峡水泥有限公司生产的 P · O 42.5 普通硅酸盐水泥;粗骨料采用 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,采用自来水进行搅拌。将拌合物置入钢模,并在振动台振捣成型,静置 24 h 后待试件硬化拆模,然后在标准条件下养护 28 d。混凝土强度等级为 C30,材料用量为:粗骨料1 046.1 kg/m<sup>3</sup>,细骨料 676.9 kg/m<sup>3</sup>,水 175.0 kg/m<sup>3</sup>,水泥 291.0 kg/m<sup>3</sup>。冻融设备采用三峡大学 TR-TSDRSL 型冻融循环系统,将养护后的试件放入水中浸泡 4 d,随后进行冻融循环试验。试验拟采用 0,10,25,35 和 50 次 5 组冻融循环次数并进行相应编号,按照 GB/T 50082—2009 中的"快冻法"进行试验,试件中心温度控制在(-17±2)~(8±2)℃,试件内外温 差不超过 28℃,冻融循环 1 次耗时 14 h。

#### 1.2 试验加载

力学试验设备采用三峡大学 10 MN 大型多功能液压伺服静动力三轴仪,该加载装置主要组成部分为主伺服油源、辅助伺服油源、加载框架、EDC 控制器和数据采集系统。

试验加载过程分3步进行:①将冻融混凝土试件放置 在加载框架上,安装竖直方向变形计,调整试件位置与传力 柱轴心对中,开启油泵后进行预加载,在竖直方向预施加荷 载至20 kN后保持稳定,以保证试件加载面与传力柱之间 充分接触;②清零变形计并开始记录,以0.5 MPa/s 的加载 速率对试件单调加载至预先设定的0.4f。幅值,然后以相同 速率卸载至20 kN;③对卸载后的冻融混凝土试件以10<sup>-4</sup>/s 的加载速率进行动态单轴抗压试验直至试件破坏,最后保 存试验数据。



在试验加载过程中第1步和第2步采用荷载控制方 式,第3步使用变形控制方式。图1为荷载历史加载过程中的荷载--时间曲线。

2 基本力学参数分析

根据上述试验方法,应变速率为 10<sup>-4</sup>/s 下,0,10,25,35 和 50 次冻融次数后,混凝土历经单调加载历史 后的峰值应力 σ<sub>pk</sub>分别为 44.54,34.74,26.51,24.99 和 20.37 MPa。可见,历经相同加载历史作用后的混凝 土在同一加载速率下的单轴极限抗压强度随着冻融循环次数的增加强度明显降低。相对于 0 次冻融循环作 用,混凝土抗压强度在 10,25,35 和 50 次冻融循环后的单轴抗压强度分别降低了 22%,40%,44%和 54%。

张俊萌等<sup>[10]</sup>研究认为冻融混凝土的抗压强度随循环次数呈二次抛物线趋势逐步下降。本文加载速率 取 10<sup>-4</sup>/s, 历经 0,10,25,35 和 50 次循环作用后, 历经荷载历史的混凝土单轴抗压强度与冻融循环次数的关系可用式(1) 描述如下:

$$f_{\rm dr}/f_{\rm c} = aN^2 + bN + c \tag{1}$$

式中:f<sub>c</sub>为常态混凝土历经荷载历史后的单轴抗压强度;f<sub>d</sub>为不同冻融循环次数后混凝土历经荷载历史后的 单轴抗压强度;N为冻融循环次数;a,b和c均为拟合参数。经统计回归求得在10<sup>-4</sup>/s加载速率下,历经0, 10,25,35和50次冻融循环后混凝土在相同加载幅值作用下的单轴抗压强度的相关系数为:a=0.9916; b = -0.02013; c = 0.0019, 拟合相关度  $R^2 = 0.98$ 。说明式(1)能够较好地反映历经相同加载历史作用后的 混凝土在同一加载速率下单轴极限抗压强度与冻融循环次数 N 的变化规律。

3 基于损伤本构模型的分析

## 3.1 本构模型建立

在混凝土单轴受压状态作用下的动态损伤本构研究方面,王春来等<sup>[11]</sup>利用 Weibull 统计分布理论和等 效应变假定原理,根据材料强度服从 Weibull 统计分布特点,认为材料的损伤参数 D 也服从该统计分布。

根据 Weibull 统计建立的应力应变关系为

$$\boldsymbol{\sigma} = E\boldsymbol{\varepsilon}\{\exp\left[-\left(\boldsymbol{\varepsilon}/\boldsymbol{\varepsilon}_{\mathrm{pk}}\right)^{m}/m\right]\}$$
<sup>(2)</sup>

式中:m 为曲线形状参数,  $m = 1/\ln(E\varepsilon_{pk}/\sigma_{pk})$ 

文献[12]对上述损伤本构模型做出了以下修正,将应力应变曲线的下降段采用 Lognormal 统计分布规律进行描述。根据 Lognormal 统计建立的应力应变关系为

$$\sigma = a \exp\{-0.5 \left[\ln(\varepsilon/b)/t\right]^2\}$$
(3)

由几何边界条件, 
$$\varepsilon = \varepsilon_{pk}$$
,  $d\sigma/d\varepsilon = 0$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_{pk}$ ,  $\sigma = \sigma_{pk}$  对式(3)进行求导可得

$$d\sigma/d\varepsilon = -a\ln(\varepsilon/b)/(t^{2}\varepsilon)\exp\{-0.5\left[\ln(\varepsilon/b)/t\right]^{2}\}$$
(4)

将边界条件代入式(4)可得  $b = \varepsilon_{pk}, a = \sigma_{pk}$ ,即峰值后的应力-应变关系可得

$$\sigma = \sigma_{\rm pk} \exp\{-0.5 \left[\ln(\varepsilon/\varepsilon_{\rm pk})/t\right]^2\}$$
(5)

从而,经过修正后建立的损伤本构模型为

$$\sigma = \begin{cases} \mathcal{E}\varepsilon \left\{ \exp\left[ -\left(\varepsilon/\varepsilon_{\rm pk}\right)^m/m \right] \right\}, 0 \le \varepsilon < \varepsilon_{\rm pk} \\ \sigma_{\rm pk} \exp\left\{ -0.5 \left[ \ln(\varepsilon/\varepsilon_{\rm pk})/t \right]^2 \right\}, \varepsilon \ge \varepsilon_{\rm pk} \end{cases}$$
(6)

式中:  $\varepsilon_{pk}$  为峰荷应变值;  $\sigma_{pk}$  为峰值应力;  $\tau$  为初始弹性模量;  $m \pi t$  为曲线上升段与下降段的形状参数, 通过对试验数据拟合得到。运用该模型对不同冻融循环混凝土试件动态单轴试验曲线进行拟合分析(见图 2), 其中 DR0, DR10, DR25, DR35 和 DR50 分别为 0, 10, 25, 35 和 50 次冻融循环的试验试件。



Fig. 2 Comparison of dynamic uniaxial test results under different freeze-thaw cycles

由图 2 看出,修正后的 Weibull-Lognormal 分段式统计分布模型能够较好拟合冻融循环混凝土历经荷载 历史作用后单轴应力应变曲线,该模型参数少且拟合效果较好,具有广泛的实际工程应用前景。

# 3.2 损伤演化分析

根据 Lemaitre 提出的应变等效原理:  $\sigma = E(1 - D)$ ,从而,建立的损伤模型如下所示,得到 Weibull-Lognormal 分段损伤模型为

$$D = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\varepsilon/\varepsilon_{\rm pk}\right)^{m}/m\right], 0 \le \varepsilon < \varepsilon_{\rm pk} \\ 1 - \sigma_{\rm pk}/(E\varepsilon) \exp\left\{-0.5\left[\ln\left(\varepsilon/\varepsilon_{\rm pk}\right)/t\right]^{2}\right\}, \varepsilon \ge \varepsilon_{\rm pk} \end{cases}$$
(7)

不同冻融劣化混凝土单调荷载历史作用后单轴损伤演化图如图 3 所示。在加载过程中,由 3 种不同冻

融程度混凝土的损伤演化可知:不同工况下,曲线形式大体相同,随着残余应变的不断累积,损伤发展均表现为由快到慢的变化趋势。但冻融循环次数的增加,导致混凝土的损伤演化路径向前推移,损伤发展速度加快,且冻融次数差异越大,损伤路径差异越大。

损伤路径的差异性主要表现为,在相同累积应变下随着冻融次数的增加,损伤值 D 逐渐增大,且初始损伤曲线的斜率不断提高,说明低温环境的循环次数越多对混凝土造成的损伤程度越大且在加载过程中环境导致的材料损伤加快了混凝土破坏。在相同损伤累积程度下,冻融循环次数越大的混凝土累积





应变越小,在损伤发展后期阶段,冻融程度越大,损伤路径趋于扁平并大幅度延长,直至进入破坏阶段。表明 较高冻融循环次数对混凝土造成的初始损伤累积高于低循环次数,同时冻融对材料产生破坏的同时也减小 了自身刚度。

由于混凝土是一种具有初始缺陷的材料,基相和分散相之间存在的缺陷则称之为损伤。从损伤力学的 角度,外界因素的影响,使得原始缺陷得到发展形成了新的损伤并形成微裂缝。在混凝土冻融循环阶段,饱 和混凝土受冻导致毛细孔内水结冰体积增大,所以材料内部的骨料结构发生改变,孔隙体积变大,微裂纹逐 渐形成并扩展蔓延到相邻砂浆,使得混凝土体积膨胀并产生一定损坏。但冻融对材料产生破坏的同时也减 小了自身刚度,所以在冻融程度相对较轻的混凝土后期损伤路径大幅度缩短,直接进入破坏阶段。

# 4 结 语

(1) 历经相同加载历史作用后的混凝土单轴抗压强度随冻融循环次数的增加,强度明显降低,同时混凝 土单轴抗压强度与冻融循环次数之间呈二次曲线关系。

(2)试验验证表明,修正后的 Weibull-Lognormal 分段式本构模型能够较好拟合冻融循环混凝土历经荷载历史作用后单轴应力应变曲线。

(3) 基于 Weibull-Lognormal 本构模型分析发现,随着冻融次数的增加,混凝土的损伤演化路径向前推移,说明冻融循环次数越多对混凝土造成的损伤越大。在损伤发展的后期阶段,冻融程度较大的混凝土损伤路径有大幅度延长且趋于扁平化,直至进入破坏阶段。

## 参考文献:

- 尹有君. 冻融条件下湿筛大骨料混凝土多轴强度的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008. (YIN Youjun. Study on the strength of wet-screened mass concrete under multiaxial stress states after freeze-thaw cycles[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese))
- [2] 覃丽坤,宋宏伟,王秀伟. 引气混凝土在海水中冻融循环后单轴强度试验研究[J]. 大连民族学院学报, 2015, 17(1): 65-68. (QIN Likun, SONG Hongwei, WANG Xiuwei. Study on uniaxial strength of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles in seawater[J]. Journal of Dalian Nationalities University, 2015, 17(1): 65-68. (in Chinese))
- [3] 田威,邢凯,谢永利. 冻融环境下混凝土损伤劣化机制的力学试验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(3): 299-304. (TIAN Wei, XING Kai, XIE Yongli. Experimental study on the mechanical property and damage evolution of concrete under freeze-thaw environment[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(3): 299-304. (in Chinese))
- [4] SUZUKI T, OGATA H, TAKADA R, et al. Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(12): 2347-2352.
- [5] 徐超. 加载历史对混凝土动态特性的影响[D]. 宜昌: 三峡大学, 2012. (XU Chao. The effect of dynamic behaviour of concrete by loading history[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2012. (in Chinese))
- [6] 肖诗云,张剑. 历经荷载历史混凝土动态受压试验研究[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(1): 78-83. (XIAO Shiyun,

ZHANG Jian. Study on dynamic compressive loading of concrete by loading history [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(1): 78-83. (in Chinese))

- [7] 宋玉普,徐秀娟,刘浩. 冻融循环后全级配混凝土及其湿筛混凝土的力学性能比较[J]. 水利学报, 2012, 43(1): 69-75.
   (SONG Yupu, XU Xiujuan, LIU Hao. Comparison of mechanical properties of fully graded concrete and wet screened concrete after freeze-thaw cycles[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(1): 69-75. (in Chinese))
- [8] 覃丽坤, 宋宏伟, 王秀伟. 冻融循环后混凝土单轴及多轴强度的对比分析[J]. 混凝土, 2013(2): 8-11. (QIN Likun, SONG Hongwei, WANG Xiuwei. Contrast analysis of uniaxial and multi-axle compression strength of concrete after freeze-thaw cycles[J]. Concrete, 2013(2): 8-11. (in Chinese))
- [9] 张连英, 刘瑞雪, 李雁, 等. 冻融循环下不同强度混凝土损伤力学特性的试验研究[J]. 水利学报, 2014(增1): 143-146. (ZHANG Lianying, LIU Ruixue, LI Yan, et al. Experimental study on the damage mechanical property of concrete under freezethaw environment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014(Suppl1): 143-146. (in Chinese))
- [10] 张俊萌,方从启,段桂珍. 约束混凝土和素混凝土抗冻性能对比研究[J]. 混凝土,2014(3):25-29. (ZHANG Junmeng, FANG Congqi, DUAN Guizhen. Comparative investigation on anti-freeze behavior of confined and plain concrete[J]. Concrete, 2014(3):25-29. (in Chinese))
- [11] 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))
- [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(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(1): 11-18. (in Chinese))

# Experimental studies on dynamic properties of concrete under different freeze-thaw cycles

LIU Bowen, PENG Gang, WANG Xiaozheng, MA Xiaoliang, DENG Yuan

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

Abstract: In order to make studies of unfavorable effects of the freezing and thawing cycles upon the dynamic properties of the concrete, the laboratory tests, which suffered 40% of  $f_c$  loading history of the concrete specimens after 0, 10, 25, 35 and 50 cycles of the freezing and thawing ( $f_c$  defined as the uniaxial compressive strength of the ordinary concrete) were carried out by a 10 MN large multi-purpose static and dynamic triaxial apparatus at a strain rate of 10<sup>-4</sup>/s. The uniaxial compressive strength of the concrete under the action of the cyclic freezing and thawing was obtained, and the damage evolution law and failure mechanism were analyzed. The testing results show that the uniaxial compressive strength of the concrete decreased with the increase in the number of the freeze-thaw cycles, and the peak stress along with the change of the freeze-thaw cycles was characterized by a quadratic curve relationship. And from the testing results it is found that the validated Weibull-Lognormal segment type damage constitutive model can be well used for fitting the uniaxial stress-strain curves of the concrete deteriorated by the freeze-thaw cycle damages after the loading histories. In addition, the number of the freeze-thaw cycles of the concrete is more, the degree of damage to the concrete is greater, and in the later stages of damage development, the damage path of the concrete with a large degree of freezing and thawing is greatly prolonged and tends to flattening until it is in the damage stage.

Key words: concrete; freeze-thaw cycles; loading history; damage constitutive model