

# 面板混凝土冻融劣化后动力性能的研究

李岩, 王瑞骏, 秦睿, 赖韩, 李晓彤  
(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 为研究应变速率对面板混凝土经冻融劣化后动力性能的影响, 对面板混凝土进行不同次数(0、25、50、75、100、125、150、175、200次)的冻融循环和不同应变速率( $1 \times 10^{-5}$ 、 $1 \times 10^{-4}$ 、 $2 \times 10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-4}$ 、 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ )的单轴压缩以及常规三轴试验。结果表明: 单轴压缩试验下, 应变速率相同的面板混凝土, 冻融劣化程度加大, 其动态极限抗压强度逐渐降低, 峰值应变逐渐提高; 冻融次数相同的面板混凝土, 随着应变速率的增大, 其单轴动态极限抗压强度随之增大, 峰值应变随之降低。常规三轴试验下, 经100次冻融循环、同一应变速率的面板混凝土, 随着围压的增大, 其极限抗压强度增幅减弱, 混凝土的率敏感性有所降低, 峰值应变随之提高。

**关键词:** 面板混凝土; 冻融循环; 应变速率; 动力性能; 损坏准则

中图分类号: TU37

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)06-0184-06

## Dynamic performance of panel concrete after freeze – thaw deterioration

LI Yan, WANG Ruijun, QIN Rui, LAI Han, LI Xiaotong

(Faculty of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to study the effects of different strain rates on the dynamic performance of panel concrete after freeze-thaw degradation, uniaxial compression and conventional triaxial experiments were carried on panel concrete with different freeze-thaw cycles (0, 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, and 200 times, respectively) and different strain rates ( $1 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-4}$ ,  $2 \times 10^{-4}$ ,  $5 \times 10^{-4}$ ,  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , respectively). The results showed that under the uniaxial compression test, the concrete with the same strain rate has a greater degree of freeze-thaw deterioration, and its dynamic ultimate compressive strength gradually decreases, and the peak strain gradually increases. The concrete of same freeze-thaw cycles will increase the uniaxial dynamic ultimate compressive strength and decrease the peak strain as the strain rate increases. Under the conventional triaxial test, the panel concrete with the same strain rate after 100 freeze-thaw cycles and with the increase of confining pressure, the rate sensitivity of concrete decreases and the peak strain increases with the ultimate compressive strength increases.

**Key words:** panel concrete; freeze-thaw cycle; strain rate; dynamic performance; damage criterion

## 1 研究背景

在面板混凝土实际的服役环境中, 经常受到动荷载的作用。而在我国的东北、华北寒冷地区, 混凝土结构在环境因素的影响下, 其耐久性受到严重损害。因此对于冻融劣化后面板混凝土动力性能的研究意义重大。

目前, 对冻融循环后混凝土基本力学性能方面开展了较多的研究。操佩等<sup>[1]</sup>、徐童淋等<sup>[2]</sup>研究了

冻融后混凝土动力性能的变化, 给出混凝土动态损伤本构模型。田威等<sup>[3]</sup>、王海涛等<sup>[4]</sup>研究得出经冻融循环作用后的混凝土在不同加载速率下的单轴压缩破坏规律。朱孔峰等<sup>[5]</sup>提出了冻融后有关混凝土强度和变形关系式。Ma Qinyong 等<sup>[6]</sup>通过对经冻融循环作用后的泥岩和沙质泥岩进行试验, 测其动态抗压强度和能量分布的规律。Li Jieli 等<sup>[7]</sup>研究发现冻融劣化后, 砂岩的微孔隙尺寸明显增大, 孔隙结构的变化会引起其力学性能的改变。李龙

收稿日期: 2018-07-19; 修回日期: 2018-09-04

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(17JS092)

作者简介: 李岩(1992-), 男, 安徽人, 在读硕士研究生, 研究方向为水工结构分析及数值仿真。

通讯作者: 王瑞骏(1963-), 男, 陕西人, 博士, 教授, 研究方向为坝工应力。

等<sup>[8]</sup>运用 abaqus 有限元软件对再生混凝土力学性能的应变率敏感性进行模拟研究,通过对混凝土峰值应力和弹性模量的动态增长因子随应变率的变化趋势来探讨骨料、砂浆的率敏感性,以此研究其对混凝土整体率敏感性的影响。杨益等<sup>[9]</sup>对掺钢和玄武岩的纤维材质混凝土进行抗冻试验,并拟合出可以用于预测其耐久性衰减的二次函数模型,精度较高。孙中明等<sup>[10]</sup>在不同应变速率下对岩石进行了单轴压缩试验,研究得出岩石的峰值应力和应变与应变率成正比,试件的长径比影响着临界应变率。

从目前的研究成果看来,有关冻融循环作用后混凝土的动态力学特性方面的成果很少,尤其在三轴试验下的动力特性研究更少<sup>[11-15]</sup>。基于此,本文对冻融劣化后的面板混凝土试件进行了单轴压缩和常规三轴试验,比较不同冻融循环次数、不同应变速率下的混凝土动态性能;在同时考虑冻融循环作用和应变速率影响下,探索混凝土的破坏准则。

## 2 试验概况

### 2.1 试验原材料

本次试验采用铜川水泥厂生产的 P·O 42.2 级普通硅酸盐水泥;掺和料为 II 级粉煤灰;细骨料为渭河中砂,细度模数为 2.35;粗骨料为粒径 5~30 mm

的卵石,其中粒径为 5~20 mm 和 20~30 mm(图 1)用量分别为粗骨料总用量的一半;拌合水为自来水;高效三萜皂甙引气剂;聚羧基酸减水剂。

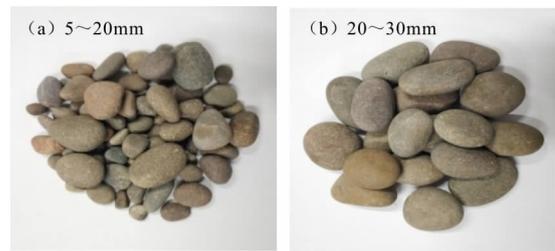


图 1 二级配粗骨料示意图

### 2.2 配合比的设计

本试验依照面板堆石坝相应的规范及已建工程<sup>[16]</sup>的规定,具体配合比数值见表 1。

### 2.3 试验主要设备和方法

冻融试验设备如图 2 所示。经 24 d 养护,将试件浸泡在  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  的水中 4 d 后擦干其表面,开始测定起始质量和自振频率,再进行冻融循环试验。

动静三轴试验机用于动力试验,如图 3 所示。其中,单轴压缩试验采用  $1 \times 10^{-5}$ 、 $1 \times 10^{-4}$ 、 $2 \times 10^{-4}$ 、 $5 \times 10^{-4}$  和  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  5 种应变速率,常规三轴试验采用的应变速率为单轴压缩试验的后 4 种应变速率。

表 1 面板混凝土试验配合比

水胶比	水/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	水泥/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粉煤灰/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	砂/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	石/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	减水剂/ %	引气剂/ %
0.40	136	285	55	705	1253	0.8	0.003



图 2 快速冻融试验机



图 3 DTD-2000kN 微机伺服粗粒土动静三轴仪

## 3 试验结果与分析

### 3.1 质量特性

混凝土抗冻性的一个重要评价指标是质量损失。根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方

法标准》(GB/T 50082-2009)的要求,对经 100 次冻融循环后的 15 个棱柱体试件进行试验,试件尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 。对其质量损失率和冻融循环次数的关系进行分析,表达式如下:

$$M(N) = a + bN + cN^2 \quad (1)$$

式中： $M(N)$  为冻融  $N$  次后的质量损失率，%； $N$  为冻融次数； $a, b, c$  为回归系数。由试验数据求得  $a = 0.0226$ ， $b = -0.0069$ ， $c = 0.0001$  及相关系数  $R^2 = 0.9781$ 。拟合后效果如图 4 所示，效果较好。

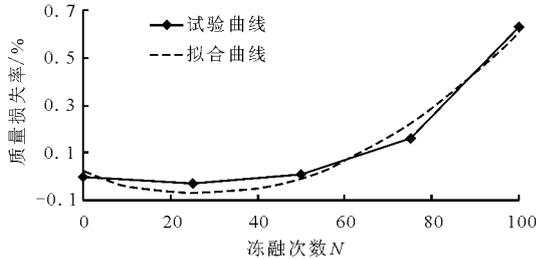


图 4 质量损失率与冻融循环次数的关系

由图 4 看出，冻融循环后的混凝土试件质量损失率先下降后上升。经 0、25、50、75、100 次冻融循环后，试件质量损失大小为 0、-0.03%、0.01%、0.16%、0.63%。经过 25 次冻融循环后混凝土试件的质量损失率为 -0.03%，是因为冻融循环作用使混凝土的空隙增大，在试件内部形成微裂隙，混凝土早期由于吸水作用增加的质量大于其由于砂浆脱落减少的质量，导致其整体质量增加；冻融循环 75 次后试件的质量损失率速度明显加快，这是由于随着冻融劣化程度的增大，早期的微裂缝演变为较宽的裂缝，混凝土表面掉渣现象严重。

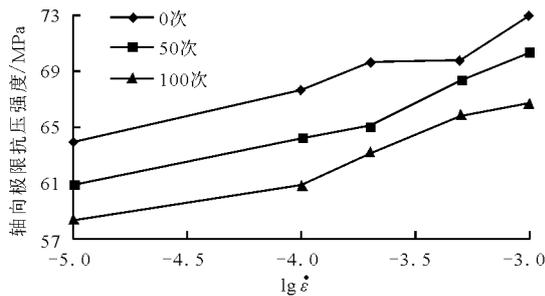


图 5 轴向抗压强度随应变速率变化关系

由图 5、6 可以看出，在冻融循环次数相同的情况下，随着应变速率的增大，混凝土单轴极限抗压强度随之提高；相同应变速率下的混凝土单轴极限抗压强度与冻融次数呈反比例关系。冻融循环 100 次后，试件的极限抗压强度损失较为严重。分析原因是冻融循环加大了混凝土的劣化程度，试件内部初始微裂缝吸水量增大，同时在冰压力的作用下裂缝有所延伸和扩展，密实度降低。在相对较高的  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  应变速率下，导致 200 次冻融循环后混凝土的单轴极限抗压强度急剧下降，且直线的斜率高于  $1 \times 10^{-5}$  和  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  应变速率所对应的斜率，极限抗压强度降低至未冻融混凝土极限抗压强度的

本试验拟合后的二次曲线具有极值点，而王海涛等<sup>[4]</sup>研究发现混凝土的质量损失率与冻融循环次数呈单调递增的抛物线关系。这是由于本试验采用的是二级配混凝土试件，王海涛等<sup>[4]</sup>试验中采用连续级配的石灰石，混凝土结构更加密实，孔隙率较小，冻融循环初期进入试件的水相对于本试验较少，试件由于砂浆掉落导致其质量减小的效应占主导地位。所以随着冻融次数的增加，试件的质量损失率表现为单调增加的抛物线关系。

### 3.2 单轴极限抗压强度

不同冻融循环次数和不同应变速率下测得混凝土的单轴动态极限抗压强度，如表 2 所示，极限抗压强度与应变速率和冻融次数的关系曲线分别如图 5 和 6 所示。

应变速率 $\dot{\epsilon} / \text{s}^{-1}$	冻融循环次数 $N$				
	0	50	100	150	200
$1 \times 10^{-5}$	63.91	60.90	58.42	51.92	40.36
$1 \times 10^{-4}$	67.59	64.23	60.87	53.87	42.17
$2 \times 10^{-4}$	69.65	65.08	63.15	55.61	39.34
$5 \times 10^{-4}$	69.73	68.34	65.83	54.93	38.06
$1 \times 10^{-3}$	72.95	70.30	66.67	50.35	35.14

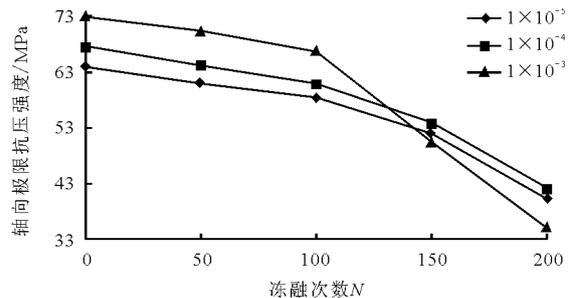


图 6 轴向抗压强度随冻融次数变化关系

50% 左右。

### 3.3 混凝土损坏准则

混凝土在实际的服役工作环境中，其基本性能不仅需考虑冻融劣化的影响，同时应变速率也是重要因素之一，故同时考虑两者的混凝土破坏准则更贴合实际情况。

闫东明等<sup>[11]</sup>研究结果表明，可用公式(2)对抗压强度增长与应变速率的关系进行拟合：

$$f_c/f_{cs} = \alpha \lg(\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{cs}) + \beta \quad (2)$$

式中： $f_c/f_{cs}$  为极限抗压强度增加因子； $f_c$  为某一应变速率的抗压强度，MPa； $f_{cs}$  为静态应变速率的抗压强

度,MPa;  $\dot{\epsilon}_c$  为某应变率;  $\dot{\epsilon}_{cs}$  为静态应变率 ( $1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ );  $\alpha, \beta$  为拟合参数。拟合效果如图 7 所示,参数取值详见表 3。

采用公式(3)对混凝土极限抗压强度增加幅度与冻融循环次数的关系进行拟合:

$$f_c/f_{cs} = aN^2 + bN + c \quad (3)$$

式中:  $f_c/f_{cs}$  为极限抗压强度的增加因子;  $f_c$  为某一

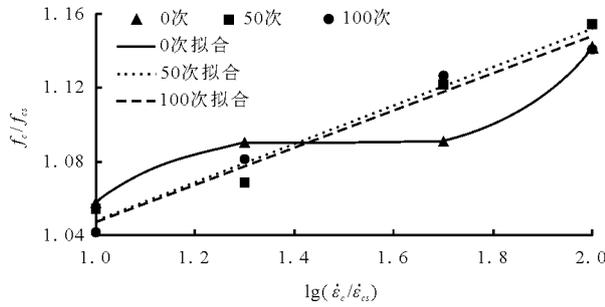


图 7 不同冻融循环次数下单轴动态抗压强度随应变率变化关系

应变率下对应的极限抗压强度,MPa;  $f_{cs}$  为准静态应变率下对应的极限抗压强度,MPa;  $a, b, c$  为拟合参数。拟合效果如图 8 所示,参数见表 4。

特别地,由于冻融循环作用前后以及高低应变率条件下对混凝土试件性能产生的差异,故对未冻融(0 次)以及相对低的应变率( $2 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ )的试件组采用高次拟合的方法。

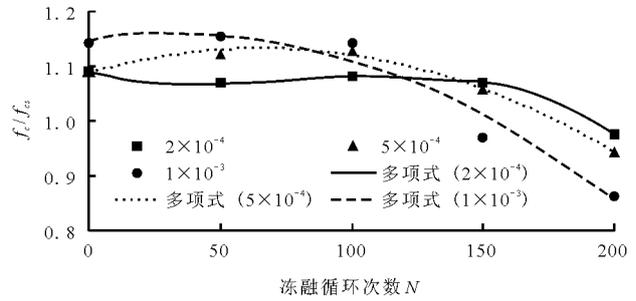


图 8 不同应变率下单轴动态抗压强度随冻融循环次数变化关系

表 3 峰值应力增加因子与相对应变率的拟合参数

冻融循环次数	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
50	0.1044	0.9433	0.9744
100	0.1015	0.9455	0.9724
0	拟合函数		0.9999
$f_c/f_{cs} = 0.3836 \lg^3(\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{cs}) - 1.6833 \lg^2(\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{cs}) + 2.4481 \lg(\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{cs}) - 0.0909$			

表 4 峰值应力增加因子与冻融循环次数的拟合参数

应变率/ $\text{s}^{-1}$	$a$	$b$	$c$	$R^2$
$5 \times 10^{-4}$	$-1 \times 10^{-5}$	0.0014	1.088	0.9948
$1 \times 10^{-3}$	$-1 \times 10^{-5}$	0.0007	1.1461	0.9568
$2 \times 10^{-4}$	拟合函数			0.9997
$f_c/f_{cs} = -8 \times 10^{-8} N^3 + 2 \times 10^{-5} N^2 - 0.0012N + 1.0899$				

由图 7 可以看出,混凝土单轴极限抗压强度增加因子与应变率的对数近似呈线性函数关系,且相关性较好。对比冻融循环 50 和 100 次的拟合公式,可以发现随着混凝土冻融劣化程度的增大,曲线的斜率减小,表现为混凝土的率敏感性下降。这是由于冻融循环作用初期,混凝土内部逐渐形成微裂纹,其周围的自由水不断被吸入。随后,混凝土内部损伤加重,增大了微裂纹的初期宽度,增多了孔隙,此时由于挤压作用水的楔入作用进一步提高,导致 100 次冻融循环的拟合曲线增长变慢。

由图 8 可以看出,混凝土单轴极限抗压强度增

加因子与冻融循环次数经拟合后大致呈二次或三次函数关系。而朱孔峰等<sup>[5]</sup>研究发现随着冻融劣化程度加大,不同应变率加载下的相对抗压强度降低。可能一方面由于试验采用的材料级配有差异,本试验粗骨料采用的是粒径为 5 ~ 20mm、20 ~ 30mm 的天然卵石,朱孔峰等<sup>[5]</sup>采用的是最大粒径 20 mm 的连续级配碎石;另一方面,混凝土材料的冻融劣化程度不同,此试验为 200 次冻融循环,而朱孔峰等<sup>[5]</sup>试验冻融循环次数最大为 75 次。

建立冻融循环和应变率耦合作用下的面板混凝土的损坏准则,可用公式(4)进行表示:

$f_c^D/f_{cs}^D = (\alpha \lg(\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{cs})) + \beta)(aN^2 + bN + c)$  (4)  
 式中： $f_c^D$  为冻融循环后某一应变速率下对应的单轴极限抗压强度,MPa； $f_{cs}^D$  为冻融循环后准静态应变速率下对应的单轴极限抗压强度,MPa； $a, b, c, \alpha$

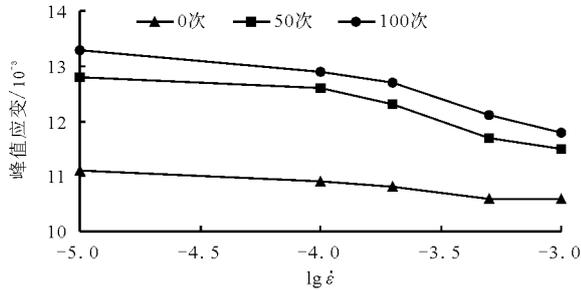


图9 峰值应变随应变速率变化关系

由图9看出,混凝土的峰值应变在相同的冻融循环次数下与应变速率成反比关系。分析原因是在较小的应变速率下,混凝土中存在较少的微裂纹,此时裂缝的扩展方式主要是沿砂浆表面处进行,直至完全贯通,破坏时微裂纹分布较为集中;试件内的微裂纹在较高的应变率下来不及充分压缩就完全破坏。由能量最少定律<sup>[17]</sup>,破坏总以能量在单位时间里减耗最少的形式发生。在高应变速率情况下,裂缝以直穿骨料的方式破坏,并且大多数的裂纹改变了破坏路径,减少了路径长度,故峰值应变减小。由图10可以看出,相同的应变速率下,混凝土的峰值应变随冻融循环次数的增加呈现增大的趋势。原因可能是冻融循环过程中,由于水的冻胀作用加快了孔隙的扩张,降低了混凝土的密实度。因此,在进行单轴压缩试验时,由于前期水的结冰膨胀形成的大孔隙首先会被压实,从而表现出峰值应变增大的现象。

峰值应变减小因子与应变速率对数间的关系如图11,为近似呈线性减小关系,以公式(5)拟合。

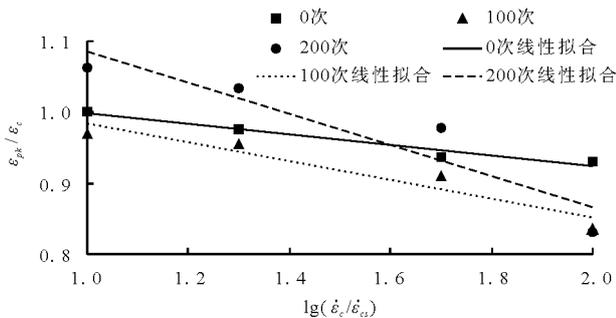


图11 不同冻融循环次数下峰值应变减小因子随应变速率变化关系

$$\epsilon_{pk}/\epsilon_c = \alpha \lg(\dot{\epsilon}_c/\dot{\epsilon}_{cs}) + \beta \quad (5)$$

式中： $\epsilon_{pk}/\epsilon_c$  为峰值应变减小因子； $\epsilon_{pk}$  为某一应变

和 $\beta$ 为求得的拟合参数。

### 3.4 单轴峰值应变

混凝土试件的峰值应变随应变速率和冻融循环次数的关系分别如图9和10所示。

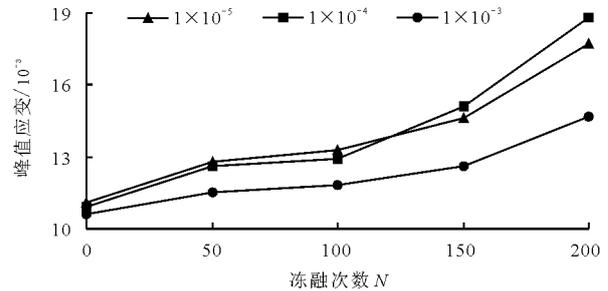


图10 峰值应变随冻融次数变化关系

率下峰值应变； $\epsilon_c$  为静态下峰值应变； $\alpha, \beta$  为材料参数,见表5。

表5 峰值应变减小因子与相对应变速率的拟合参数

冻融循环次数	$\alpha$	$\beta$	$R^2$
0	-0.0741	1.0721	0.9658
100	-0.1322	1.1156	0.9152
200	-0.2192	1.3047	0.8722

根据表5可知,混凝土峰值应变减小因子与应变速率对数间的线性关系较好,具有较强的相关性。

### 3.5 常规三轴试验下极限抗压强度和峰值应变

对面板混凝土试件经100次冻融循环后在不同围压(0、5、10 MPa)下进行动态力学性能研究,混凝土极限抗压强度和峰值应变在不同围压下与应变速率和应变速率对数间的关系如图12和13所示。

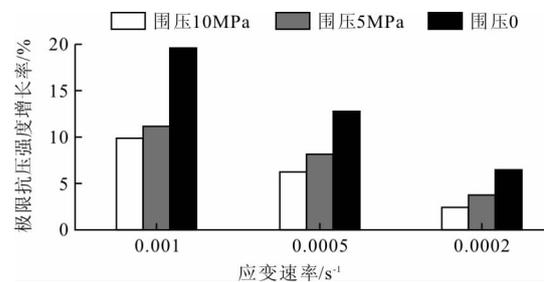


图12 极限抗压强度增长率随应变速率变化关系

由图12可以看出,同一应变速率下,随着围压的增加,混凝土轴向抗压强度值增大,混凝土极限抗压强度的增幅却逐渐减小。同时,应变速率对混凝土极限抗压强度的影响作用随着围压的增加逐渐减弱,说明由于围压的存在使得混凝土的率敏感性有所降低。即当围压超过某个值时,不再考虑应变速率这一因素对于混凝土的极限抗压强度的影响。而

闫东明等<sup>[11]</sup>研究发现该值即为混凝土的单轴抗压强度,分析原因可能是冻融循环后试件内部微裂缝的扩展以及混凝土自身材料等原因造成的。

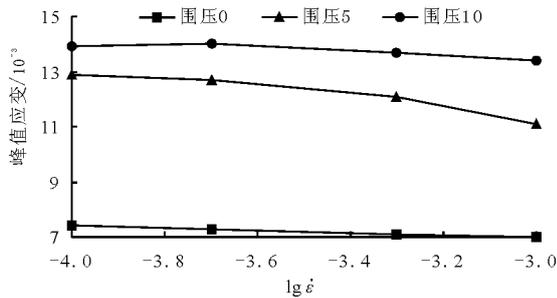


图 13 峰值应变随应变速率变化关系

由图 13 可以看出,应变速率相同时,混凝土试件峰值应变与围压值成正比。说明围压的存在限制了试件的侧向变形和裂缝发展,混凝土的延性增强。同时,峰值应变随应变速率的增大变化不大,总体较为平稳。与单轴峰值应变结果有所差异,分析原因可能是由于围压的作用限制了混凝土内部微裂缝的延伸发展,使其难以直接穿过骨料发生破坏。

## 4 结 论

本文对经冻融循环作用下面板混凝土在不同应变速率下单轴压缩和常规三轴试验为基础,研究混凝土的动力性能,主要结论如下:

(1) 随着冻融循环次数的增加,面板混凝土的质量损失率先下降后上升,拟合后曲线的形态为具有极值点的二次曲线。

(2) 对于单轴压缩试验,混凝土极限抗压强度增加因子和峰值应变减小因子在相同冻融次数下与应变速率的对数近似呈线性函数关系;同一应变速率下,混凝土极限抗压强度增加因子与冻融循环次数经拟合后大致呈二次或三次函数关系;通过对比 50 和 100 次冻融循环下混凝土单轴极限抗压强度增加因子与应变速率对数的拟合关系式,可以看出混凝土的率敏感性随着混凝土冻融劣化程度的增大而减小。

(3) 对于常规三轴试验,在 100 次冻融循环和相同应变速率下,随着围压的增大,试件极限抗压强度提高;峰值应变在相同的围压下随应变速率的增大变化较为平稳。

(4) 根据试验结果,同时考虑冻融和应变速率作用建立面板混凝土损坏准则,对严寒地区水工建筑物具有工程实践意义。

## 参考文献:

- [1] 操佩,彭刚,柳琪,谢京辉. 冻融劣化混凝土的单轴动力学特性研究[J]. 水利水电技术,2016,47(12):105-110.
- [2] 徐童淋,彭刚,杨乃鑫,柳琪. 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.
- [3] 田威,韩女,张鹏坤. 混凝土冻融循环下动态破坏机理的试验研究[J]. 振动与冲击,2017,36(8):79-85.
- [4] 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.
- [5] 朱孔峰,逯静洲,国力,等. 受冻融混凝土动态抗压特性试验研究[J]. 硅酸盐通报,2017,36(12):4277-4283+4301.
- [6] MA Qinyong, MA Dongdong, YAO Zhaoming. Influence of freeze-thaw cycles on dynamic compressive strength and energy distribution of soft rock specimen[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 153:10-17.
- [7] LI Jieli, KAUNDA R B, ZHOU Keping. Experimental investigations on the effects of ambient freeze-thaw cycling on dynamic properties and rock pore structure deterioration of sandstone[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 154:133-141.
- [8] 李龙,肖建庄,黄凯文. 再生混凝土力学性能的应变速率敏感性数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017,47(4):776-784.
- [9] 杨益,宁翠萍,程瑞芳,等. 掺钢和玄武岩纤维混凝土的冻融循环试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(4):182-186.
- [10] 孙中明,璩继立,危鼎,等. 应变速率对上海安山岩强度和变形的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2016,27(6):222-226.
- [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.
- [12] 姚家伟,覃丽坤,宋玉普. 三轴压的普通混凝土在冻融循环后的力学性能[J]. 混凝土,2011(3):25-27.
- [13] 吴赛,赵均海,李楠,等. 被动围压下混凝土的动态力学性能研究[J]. 应用力学学报,2015,32(6):992-998+1103.
- [14] SHANG Huaishuai, SONHG Yupu, QIN Likun. Experimental study on strength and deformation of plain concrete under triaxial compression after freeze-thaw cycles[J]. Building and Environment, 2008, 43(7):1197-1204.
- [15] SHANG Huaishuai, SONG Yupu. Triaxial compressive strength of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 90-91:33-37.
- [16] 余雪颀. 水工混凝土配合比设计参数的确定分析[J]. 低碳世界,2016(28):109-110.
- [17] 周筑宝. 最小耗能原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2001.