

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.04.018

冻融损伤混凝土重复受压本构关系

徐善华, 王友德, 李安邦, 李钰茹

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 710055 西安)

摘要:为研究冻融损伤对混凝土重复受压力学性能的影响,完成了两种强度等级混凝土试块的快速冻融及重复受压试验.结果表明,冻融损伤混凝土重复受压力学性能显著降低,动力本构特征曲线也发生改变,包络线及再加载曲线在峰值应力之前因存在明显压实效应而表现出下凹形态,卸载曲线应变滞后现象严重且曲线逐渐趋于重合.在试验研究基础上,探讨了冻融循环次数、混凝土强度等级与冻融后混凝土力学性能参数及本构模型参数之间的关系,建立了冻融损伤混凝土动力本构模型.

关键词:混凝土;冻融损伤;重复受压;力学性能;本构关系

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)04-0104-07

Dynamic constitutive relation of concrete with freeze-thaw damage under repeated loading

XU Shanhua, WANG Youde, LI Anbang, LI Yuru

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In this paper, accelerated freeze-thaw tests and repeated loading tests on C40 and C50 concrete specimens were introduced to study the effects of freeze-thaw cycles on the mechanical performance of concrete under dynamic load. The test results showed that the mechanical performance of freeze-thaw damaged concrete under repeated loading decreased significantly and the characteristic curves of dynamic constitutive relation changed distinctly after freeze and thaw, the enveloping line and reloading curves before stress peak exhibited a concave shape due to the compaction effects, the strain hysteresis of unloading curve became more serious and the unloading curves tended to coincide gradually as the freeze-thaw cycles increased. The relationships between freeze-thaw cycles, strength grades of concrete and the characteristic value of stress-strain curve including mechanical properties parameters and constitutive model parameters were also studied to establish a dynamic constitutive relation for concrete with freeze-thaw damage.

Keywords: concrete; freeze-thaw damage; repeated loading; mechanical performance; constitutive relation

冻融破坏是严寒地区混凝土结构最为严重的耐久性损伤^[1],冻融在引起混凝土内部孔隙结构改变的同时,势必造成混凝土强度、变形等力学性能发生变化^[2],为此,国内外学者围绕混凝土冻融损伤机理及冻融混凝土力学性能退化规律开展了一系列研究工作.文献[3-4]对冻融混凝土力

学性能做了系统研究,并建立了抗压强度、劈裂抗拉强度等基本力学性能指标随冻融循环次数的衰减规律;文献[2]认为混凝土冻融损伤实质为材料性能退化,并建立了以动弹性模量为表征参量的混凝土承载力退化模型.部分学者在试验研究及理论分析的基础上也提出了许多具有应用价值的冻融损伤混凝土应力-应变本构模型^[5-11].文献[5-8]通过单轴受压试验,研究了冻融损伤混凝土强度、刚度、变形能力等基本力学性能指标的衰减规律,并建立了冻融循环后混凝土单轴受压应力-应变模型;文献[9-10]通过双向受压试验,研

收稿日期: 2014-04-03.
基金项目: 国家自然科学基金(51078307);教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT13089).
作者简介: 徐善华(1963—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 徐善华, xushanhua@163.com.

究了冻融循环对混凝土变形和强度的影响,建立了冻融混凝土在双向压荷载作用下的破坏准则及应力-应变关系模型;文献[11]研究了冻融混凝土三向受压荷载作用下变形及强度的退化规律,提出了冻融损伤混凝土三向受压应力-应变模型.

但现有研究成果很难反映重复荷载作用下冻融损伤混凝土动力本构变化规律,其模型对分析地震作用下冻融损伤混凝土结构动力灾变机理不具有普遍的适用性.本文通过 24 块冻融损伤混凝土试件重复荷载试验,研究冻融损伤对混凝土重复受压力学性能的影响,探讨冻融循环次数、混凝土强度等级与混凝土应力-应变曲线之间的关

系,建立冻融损伤混凝土动力本构模型,其成果可为寒冷地区既有混凝土结构抗震性能分析提供技术支持.

1 试验方案

1.1 试件制作

本次试验采用秦岭 42.5 普通硅酸盐水泥;砂采用天然河砂,含泥量小于 2%;粗骨料为碎石,粒径 5 ~ 20 mm;拌和水为自来水.试验依据 JGJ55—2011《普通混凝土配合比设计规程》进行配合比设计,如表 1 所示.试验制备了两批次共 24 个重复受压试件,试件尺寸 100 mm×100 mm×300 mm.

表 1 混凝土配合比及抗压性能指标

批次	水灰比	水/(kg·m ⁻³)	水泥/(kg·m ⁻³)	砂/(kg·m ⁻³)	石子/(kg·m ⁻³)	28 d 立方体抗压强度/MPa
C40	0.49	195	398	615	1192	43.7
C50	0.40	195	488	533	1184	53.6

1.2 快速冻融及重复受压荷载试验

快速冻融试验依据 GB/T50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行,对两批次试件分别进行 50 次、100 次、150 次冻融循环,每组 3 个试件.

重复受压荷载试验在 WAW-1000 电液伺服万能试验机上进行.试验加载制度如下:达到预估荷载峰值 60% ~ 70% 之前,按 0.2 mm/min 速率进行加卸载;超过预估峰值 70% 之后,则以 0.1 mm/min 速率进行加卸载,试验至应力趋于稳定或试件完全破坏.

2 试验结果及分析

2.1 重复受压破坏过程

加载初期 ($\sigma < 0.4f_c$),未冻融混凝土试件处于弹性阶段,表面基本没有破坏,应力应变呈比例增长;而冻融损伤混凝土试件因压实效应影响,应力-应变曲线呈非线性增长趋势.继续加荷,两类试件均处于弹塑性损伤阶段,应力-应变曲线斜

率由陡变缓.当接近峰值应力 ($\sigma \approx 0.8f_c$) 时,两者均无肉眼可见裂缝,但冻融混凝土试件掉屑明显增多.当超过峰值应力 ($\sigma \approx 1.0f_c$) 后,试件开始出现第一条可见裂缝,细且短;但随着试件的卸载,裂缝不继续发展,甚至逐渐闭合;当重新加载至上一循环卸载应变值之后,裂缝继续延伸变宽,如此往复.继续加大应变,试件表面出现多条裂缝,试件承载力迅速下降,当达到约 3 倍峰值应变时,裂缝逐渐连通形成贯通的斜向或纵向主裂缝,试件完全破坏.

两类试件重复受压破坏形态见图 1.未冻融混凝土试件破坏时,一般沿对角线方向产生一条斜向主裂缝,且沿主裂缝方向呈大面积片状或块状崩落;而冻融混凝土明显酥化,崩裂现象减弱,且随冻融次数增加,该现象更加明显,试件破坏时一般产生多条竖向主裂缝.分析认为,冻融产生大量微裂缝,使得试件受压时横向变形增大,从而导致混凝土被横向拉裂而产生竖向裂缝.

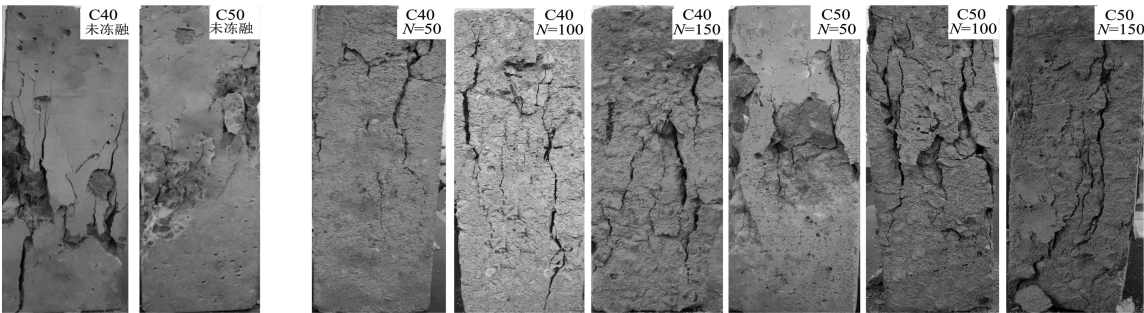


图 1 C40、C50 试件受压破坏形态(N 为冻融次数)

2.2 主要力学性能参数分析

表 2 给出了不同冻融循环次数后混凝土的峰值应力、峰值应变、初始弹性模量及峰值点割线模量。可以看出,随着冻融次数增加,两批试件的峰值应力降低,峰值应变增加,且试件强度越低,变化趋势越明显。这与文献[3,7]

结论基本相同。冻融混凝土初始切线模量(E_0)、峰值点割线模量(E_p)均有不同程度降低,但峰值点割线模量降低幅度相对较小。此外,由峰值应力及峰值应变变异系数可知,冻融混凝土力学性能指标离散性更为突出,其离散程度增大 2~4 倍。

表 2 试件重复受压力学性能特征参数

批次	N	$\Delta W/\%$	$\bar{\sigma}_1/\text{MPa}$	V_σ	$\bar{\varepsilon}_1/10^{-3}$	V_ε	$\bar{E}_0/10^4 \text{ MPa}$	$\bar{E}_p/10^4 \text{ MPa}$
C40	0	0	41.21	0.064	2.38	0.059	3.533	1.732
	50	0.61	29.12	0.219	5.67	0.234	0.247	0.514
	100	1.60	21.58	0.220	7.88	0.271	0.077	0.274
	150	3.23	16.91	0.278	8.53	0.235	0.028	0.198
C50	0	0	51.57	0.077	2.44	0.081	4.284	2.110
	50	0.11	43.00	0.165	5.53	0.225	0.495	0.778
	100	0.81	34.59	0.220	6.89	0.171	0.279	0.502
	150	1.50	30.71	0.117	7.40	0.277	0.135	0.415

注:表中数据为 3 个有效试件平均所得, ΔW 为质量损失率, $\bar{\sigma}_1$ 为平均峰值应力, V_σ 为峰值应力变异系数, $\bar{\varepsilon}_1$ 为平均峰值应变, V_ε 为峰值应变变异系数, $\bar{E}_0$ 为初始切线模量平均值, $\bar{E}_p$ 为峰值点割线模量平均值。

2.3 冻融后混凝土应力-应变曲线

图 2 给出了部分试件重复荷载作用下的应力-

应变曲线。可以看出,重复荷载作用下冻融混凝土包络线、卸载曲线、再加载曲线均发生明显改变。

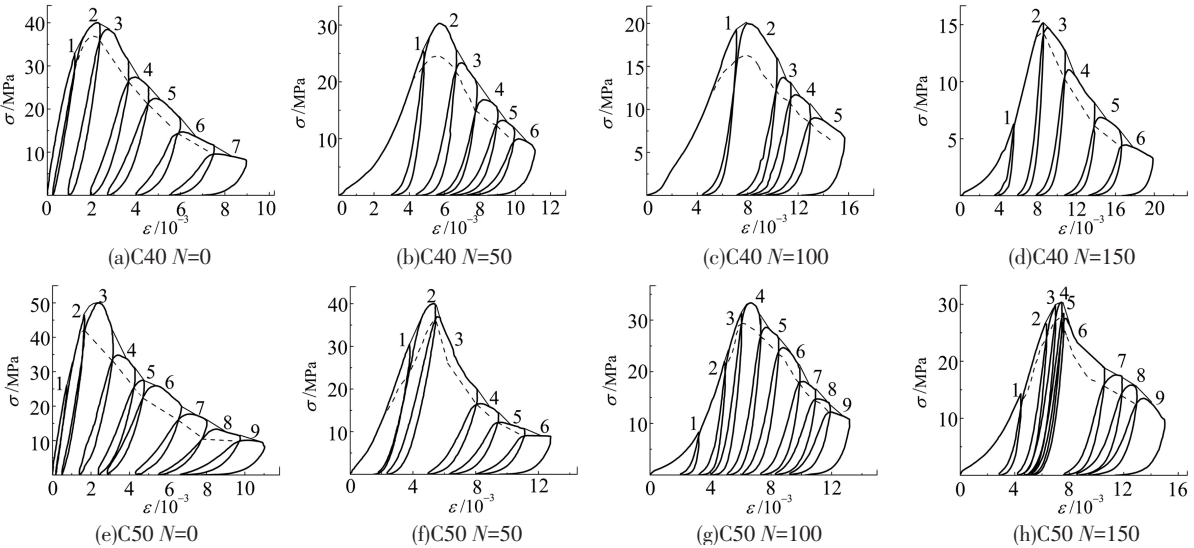


图 2 C40、C50 部分试件重复受压应力-应变曲线

2.3.1 包络线

图 3 为 C40、C50 代表性试件(峰值应力最接近该组试件平均值的试件)的包络线曲线。可以看出,混凝土经历冻融循环后包络线变得平缓,包络线上升段在加载初期有轻微上扬,呈现出下凹形态,不同于未冻融混凝土的完全外凸形态,且下凹形态随冻融次数增加变得更加严重。这是由于混凝土在经历冻融循环后,内部产生大量微裂缝,而随着压应力的增加,压实效应促进微裂缝闭合,继而刚度增加,切线模量增大^[7]。

2.3.2 卸载曲线

由包络线上一点(ε_u, σ_u)卸载至($\varepsilon_p, 0$),该曲线为卸载曲线。由图 2 发现,冻融混凝土卸载曲线应变恢复滞后现象变得更加严重。以图 2(a)、(d)的第 4 次卸载为例,未冻融混凝土应力降至 $0.3\sigma_u$ 时,应变恢复最快;而冻融损伤混凝土在应力降至 $0.1\sigma_u$ 才达到应变恢复最快速度。这充分说明冻融混凝土在受压时产生了更多纵向裂缝,高应力状态下纵向裂缝无法恢复从而导致了应变滞后现象的加剧。

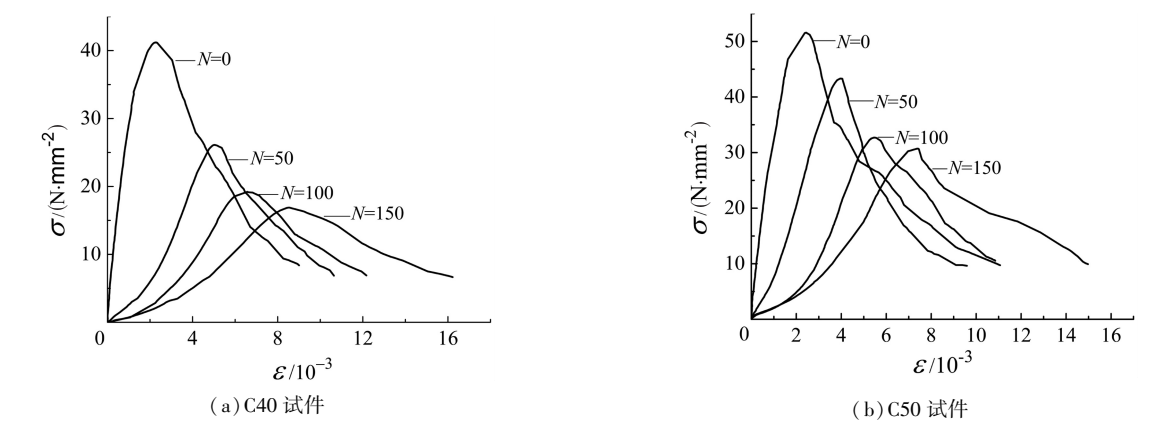


图 3 不同冻融次数代表性试件重复受压外包络线

对卸载曲线进行无量纲化,见图 4.第一次卸载时,未冻融混凝土卸载曲线基本为线性,而冻融混凝土则为明显的下凹形态.随着加卸载次数的增加,未冻融混凝土产生加卸载损伤,卸载曲线下凹程度逐渐增大,如图 4(a)、(c);而对于冻融混凝土,加卸载损伤并不明显,卸载曲线分布范围明显减小,如图 4(d)所示,当达到一定冻融次数时(C40 为 50 次,C50 为 100 次)卸载曲线分布开始趋于重合,如图 4(b)、(e).

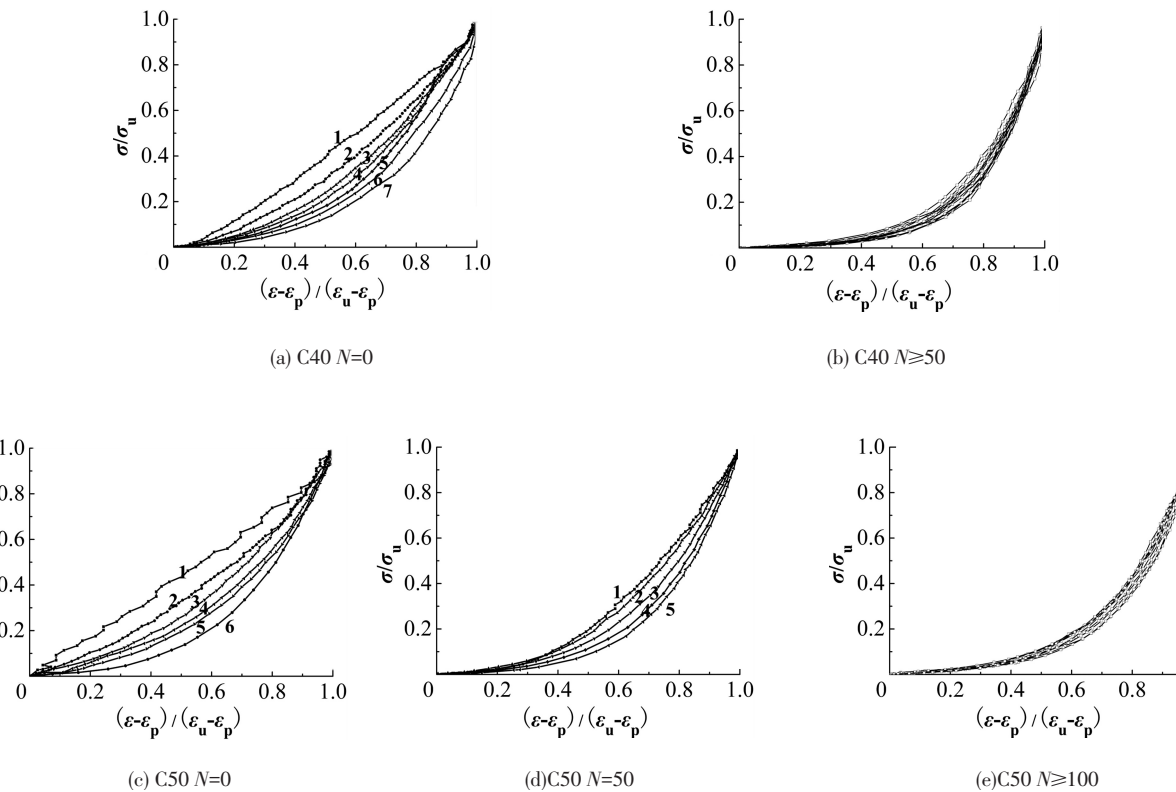


图 4 不同冻融次数混凝土试件无量纲化的卸载曲线

2.3.3 再加载曲线

从横坐标上 $(\epsilon_p, 0)$ 开始加载,直至与外包络线相切重合 (ϵ_r, σ_r) ,为再加载曲线.图 5 以 C40 试件为例,列举了冻融 0 次与 50 次之后无量纲化的再加载曲线.未冻融混凝土再加载曲线存在两种形状:应力峰值之前,曲线斜率单调减小,表现为外凸形态;而应力峰值之后,曲线斜率先增后减,存在拐点.而对于冻融混凝土,因压实效应及加载损伤的影响,应力峰值之前的再加载曲线已存在拐点;应力峰值之后,冻融与未冻融混凝土再加载曲线形态基本接近,但冻融损伤混凝土再加载曲线下凹程度明显偏大.

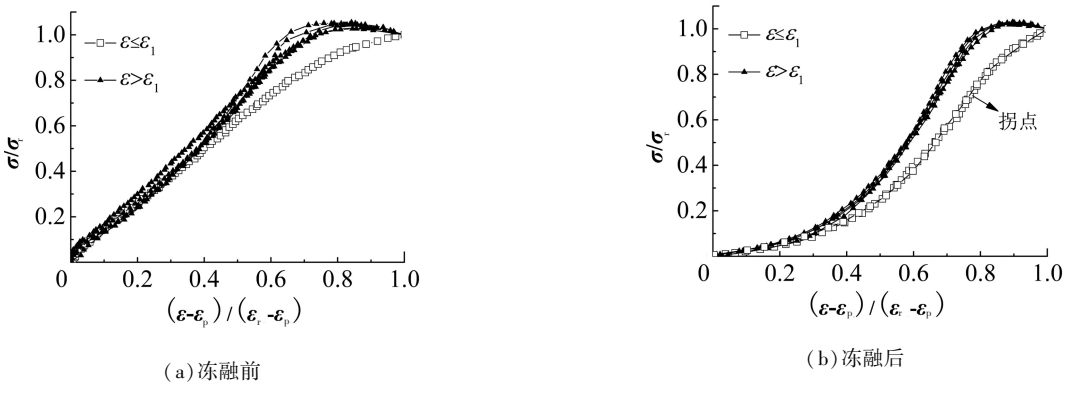


图 5 冻融前与冻融后 C40 试件无量纲化再加载曲线对比

3 冻融损伤混凝土重复受压本构模型

3.1 峰值应力和峰值应变

由图 6(a)可知,两批混凝土试件的相对峰值应力随冻融次数的增加呈现指数型降低趋势,这与文献[7]认为的线性关系不同.分析认为其原因应与混凝土冻融循环后峰值应力的降低程度有关,当峰值应力损失量在 30%以内时,基本满足线性关系;而当峰值应力损失量大于 30%时,则不再满足.因此,峰值应力损失量为 30%的冻融次数可以作为冻融混凝土力学性能的拐点.图 6(b)也建立了相对峰值应变随冻融次数的变化规律.

两批混凝土峰值应力、峰值应变与冻融次数的关系表达式为:

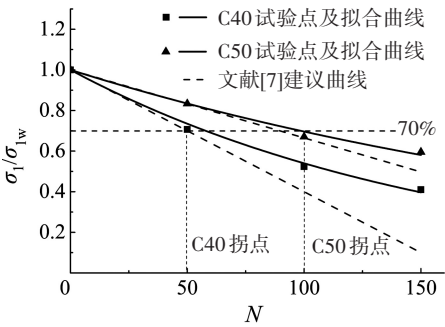
C40

$$\begin{cases} \sigma_1/\sigma_{1w} = e^{(-0.006\ 16N)}, \\ \varepsilon_1/\varepsilon_{1w} = 4.11 - 3.11 \times 0.998^N. \end{cases} \quad (1)$$

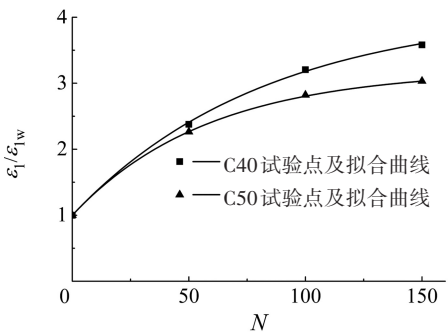
C50

$$\begin{cases} \sigma_1/\sigma_{1w} = e^{(-0.003\ 62N)}, \\ \varepsilon_1/\varepsilon_{1w} = 3.20 - 2.20 \times 0.983^N. \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_1 、 ε_1 为混凝土峰值应力、峰值应变; ε_{1w} 、 σ_{1w} 为未冻融混凝土峰值应力、峰值应变; N 为冻融循环次数.



(a) 相对峰值应力



(b) 相对峰值应变

图 6 C40、C50 试件冻融次数与相对峰值应力、相对峰值应变的关系

3.2 包络线

通常情况下,混凝土单调受压全曲线表达式可近似描述重复荷载作用下包络线的曲线形态^[12].文献[12–14]提出了多种形式的混凝土受压本构模型,文献[12]提出的本构模型在国内应用较普遍.而冻融损伤混凝土包络线上升段已经存在拐点,不再满足该本构模型上升段的适用条件(曲线斜率单调减小,且无拐点^[15]).国内许多学者针对冻融损伤混凝土提出了多种单调受压本构模型^[6–8],但实质均为文献[12]分段式本构模型,未能反映上升段压实效应.经比较分析,文献

[14]提出的有理分式能较好描述上升段的下凹形态,且能满足应力–应变全曲线的全部几何特征,故冻融混凝土包络线上升段与下降段可采用相同的函数形式,如式(3)及图 7 所示.为方便应用,将本次试验中不同冻融次数及不同强度等级混凝土的包络线参数拟合结果列于表 3.

$$y = \frac{x}{\partial(x-1)^2 + 1}, \quad (3)$$

式中: $x = \varepsilon/\varepsilon_1$, $y = \sigma/\sigma_1$; ∂ 为上升段参数 α_a 与下降段参数 α_d ,其值取决于混凝土强度等级和冻融循环次数; ε_1 、 σ_1 为峰值应力、峰值应变.

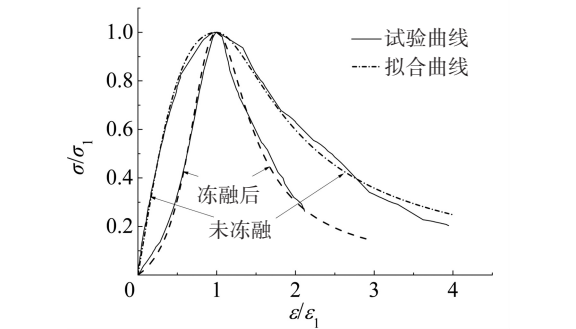


图7 冻融与未冻融混凝土无量纲化包络线对比

表3 外包络曲线参数

强度等级	<i>N</i>	α_a	α_d
C40	0	0.510	1.344
	50	4.430	4.604
	100	4.321	4.574
	150	4.500	4.456
C50	0	0.567	1.420
	50	3.705	4.010
	100	4.800	4.536
	150	4.888	4.504

由表3可知,冻融损伤混凝土包络线参数均有较大程度增长,上升段参数与下降段参数一般并不相同,而且在达到一定冻融次数之后,包络线参数趋于不变,该冻融次数正是前文提到的冻融损伤混凝土力学性能的拐点.其中,C40试件在冻融次数大于50次时包络线参数变化不明显,上升段参数为4.3~4.5,下降段参数为4.4~4.6; C50试件在冻融次数大于100次时包络线参数变化不明显,上升段参数在4.8左右,下降段参数在4.5左右.

3.3 卸载曲线

图8统计了冻融混凝土与未冻融混凝土所有卸载曲线的卸载应变与残余应变,可以看出,混凝土经历冻融循环后,卸载应变与残余应变关系发生明显改变,表现为对于相同的卸载应变比,冻融混凝土残余应变比相对较大,这与冻融加剧混凝土的损伤相吻合.根据试验数据回归分析,得到卸载点应变与残余应变的关系表达式(4)、(5).

未冻融

$$\varepsilon_p/\varepsilon_1 = 0.396(\varepsilon_u/\varepsilon_1)^{1.509}, \tag{4}$$

冻融后

$$\varepsilon_p/\varepsilon_1 = 0.649(\varepsilon_u/\varepsilon_1)^{1.183}. \tag{5}$$

由图4中无量纲化的卸载曲线可知,冻融与未冻融混凝土无量纲化卸载曲线均满足幂函数形式,如式(6)所示.未冻融混凝土卸载曲线*n*值与残余应变比的关系满足文献[16]建议公式*n* = 1 + *aε_u/ε₁*,如表4所示.

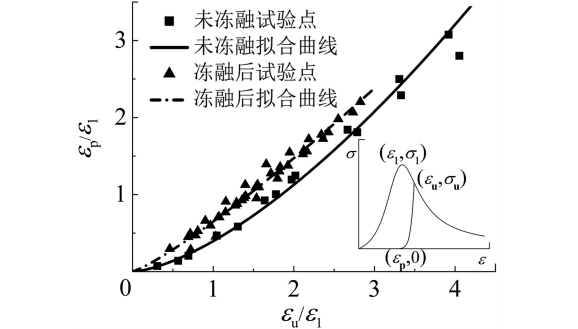


图8 卸载应变与残余应变关系

考虑到冻融损伤的影响,将卸载曲线参数*n*值建议为式(7)形式.*n_r*为重复加卸载损伤对*n*值的贡献,*n_r* = 1 + *a₀ε_u/ε₁*; *n_c*为冻融损伤对*n*值的贡献.当冻融次数较少时(*n_c* < *n_r*),加卸载过程会加剧混凝土损伤,因此*n*值随加卸载次数的增加而增大;而冻融次数较多时(*n_c* ≥ *n_r*),混凝土试件内部损伤接近饱和,不会因加卸载过程产生新的损伤,因此*n*值为恒定值;这与2.3.2节冻融损伤混凝土卸载曲线形态变化过程基本吻合.为方便应用,将两批试件不同冻融次数时卸载曲线参数拟合结果汇总于表4.

$$\frac{\sigma}{\sigma_u} = \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_u - \varepsilon_p} \right)^n, \tag{6}$$

$$n = \begin{cases} n_c + n_r, & n_c < n_r; \\ n_c, & n_c \geq n_r. \end{cases} \tag{7}$$

表4 卸载曲线参数*n*的取值

<i>N</i>	C40	C50
0 ^[16]	1 + 0.7ε _u /ε ₁	1 + 0.7ε _u /ε ₁
0	1 + 0.7ε _u /ε ₁	1 + 0.59ε _u /ε ₁
50	3.959	1.57 + 1.0ε _u /ε ₁
100	4.414	3.620
150	4.852	3.815

3.4 再加载曲线

图9统计了冻融与未冻融混凝土所有再加载曲线的再加载应变与切点应变,根据试验数据回归分析,得到再加载应变与切点应变的关系表达式(8)、(9).

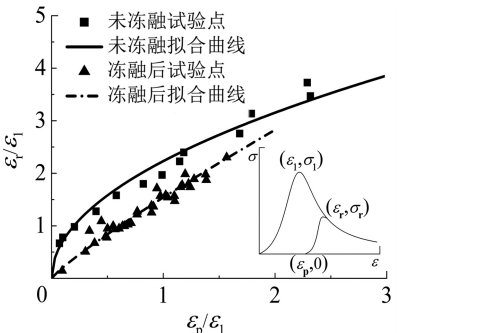


图9 再加载起点应变与切点应变关系

未冻融

$$\varepsilon_r/\varepsilon_1 = 2.231(\varepsilon_p/\varepsilon_1)^{0.499}, \tag{8}$$

冻融后

$$\varepsilon_r/\varepsilon_1 = 1.540(\varepsilon_p/\varepsilon_1)^{0.876}. \tag{9}$$

由 2.3.3 节分析可知,冻融损伤混凝土应力峰值之前与应力峰值之后的再加载曲线形态接近,因此可采用统一的函数模型来描述,如式(10)所示.式中参数 t 、 q 由本次试验数据确定,拟

合结果见表 5.可以看出,未冻融混凝土再加载曲线参数取值与文献[16]建议值基本接近,冻融后再加载曲线参数 t 、 q 都随冻融次数的增加而增大,且 C40 和 C50 混凝土分别在冻融 50 和 100 次出现转折点,拐点之后参数基本保持不变.

$$\frac{\sigma}{\sigma_r} = \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_r - \varepsilon_p} \right)^t \left(1 + q \sin \pi \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_r - \varepsilon_p} \right). \tag{10}$$

表 5 再加载曲线参数取值

N	C40				C50			
	$\varepsilon \leq \varepsilon_1$		$\varepsilon > \varepsilon_1$		$\varepsilon \leq \varepsilon_1$		$\varepsilon > \varepsilon_1$	
	t	q	t	q	t	q	t	q
0 ^[16]	0.9	0	1.4	0.6	0.9	0	1.4	0.6
0	0.9	0.2	1.1	0.5	0.9	0.1	1.0	0.4
50	2.7	0.9	2.5	1.2	1.7	0.4	1.5	0.7
100	3.0	1.0	2.6	1.2	2.4	0.5	2.2	0.9
150	3.0	1.1	2.7	1.3	2.4	0.5	2.3	1.0

4 结 论

通过不同冻融次数混凝土重复受压试验,研究重复荷载作用下冻融损伤混凝土动力本构关系,主要得出以下结论:

- 1)冻融混凝土重复受压破坏形态变得酥化,崩裂现象减弱,主裂缝条数及方向均发生改变.
- 2)随着冻融次数增加,两批试件的峰值应力、初始切线模量、峰值点割线模量均降低,峰值应变增加,且试件强度越低,变化趋势越明显.
- 3)冻融损伤混凝土包络线曲线更加平缓,且上升段表现出下凹形态,包络线可采用有理分式描述.
- 4)冻融损伤混凝土卸载曲线应变恢复滞后现象更加明显,下凹程度变大,但仍满足幂函数形式.
- 5)冻融损伤混凝土再加载曲线在应力峰值以前出现拐点,与峰值应力之后的再加载曲线形态相似,可采用统一的函数模型来描述.
- 6)建立了冻融损伤混凝土动力本构模型,并建议了不同冻融循环次数下各曲线参数的取值.本文建议的本构模型和各特征曲线参数的取值,仅适用于类似试验条件下配合比相近的混凝土.

参考文献

[1] 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(1):41-49.

[2] HANJARI K Z, KETIL P, LUNDGREN K. Modelling the structural behavior of frost-damaged reinforced concrete structures [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2013, 9: 416-431.

[3] 曹大富,富立志.冻融环境下普通混凝土力学性能的试验研究[J].混凝土,2010(10):34-36.

[4] 洪锦祥,缪昌文,刘加平,等.冻融损伤混凝土力学性能衰

减规律[J].建筑材料学报,2012,15(2):173-178.

[5] HASAN M, OKUYAMA H, SATO Y, et al. Stress-strain model of concrete damaged by freezing and thawing cycles [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, 2: 89-99.

[6] 邹超英,赵娟,梁锋,等.冻融环境下混凝土应力-应变关系的试验研究[J].哈尔滨工业大学学报,2007, 39(2):229-231.

[7] 段安,钱稼茹.受冻融环境混凝土的应力-应变全曲线试验研究[J].混凝土,2008(8):13-16.

[8] 曹大富,富立志,杨忠伟,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):17-24.

[9] SHANG Huaishuai, SONG Yupu. Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(10):1857-1864.

[10] 覃丽坤,宋玉普,于长江,等.双轴压混凝土在冻融循环后的力学性能及其破坏准则[J].工程力学,2004, 21(2):188-193.

[11] 商怀帅,宋玉普,覃丽坤,等.冻融循环后在三向受压荷载下混凝土性能的试验研究[J].水利学报,2006, 37(7):874-879.

[12] 过镇海.混凝土的强度和变形:试验基础和本构关系[M].北京:清华大学出版社,1997:31-35.

[13] HOGNESTAD E, HANSON N W, MCHENRY D. Concrete stress distribution in ultimate strength design [C]//ACI Journal Proceedings. [S.l.]:ACI, 1955:455-479.

[14] SAENZ L P. Discussion of equation for the stress-strain curve of concrete by Desayi and Krishnan [J]. ACI journal, 1964, 61(9):1229-1235.

[15] 过镇海,时旭东.钢筋混凝土原理和分析[M].北京:清华大学出版社,2003:21-24.

[16] 过镇海,张秀琴.混凝土在反复荷载作用下的全曲线[J].工业建筑,1981,9:14-17. (编辑 赵丽莹)