

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2019.01.016

冻融劣化混凝土动态轴压弹塑性损伤研究

吴聪¹, 彭刚^{1,2}

(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: 为探明处于不同冻融劣化程度的混凝土材料的动态轴压损伤特性,进行了不同冻融循环次数(0次、10次、20次、30次、40次)下的混凝土动态轴压试验。研究表明,改进后的弹塑性损伤本构模型能够很好地描述冻融劣化混凝土动态轴压损伤演化规律。冻融劣化混凝土动态轴压损伤演化过程中,损伤积累与刚度退化和塑性变形发展基本保持同步。应变速率的增大可以减缓混凝土材料损伤的发展,提高混凝土损伤发展的阈值。混凝土冻融劣化程度越低,损伤演化不同发展阶段的特征差异就越显著,并且材料会以更快的速度发生损伤破坏。

关键词: 动态性能; 应变速率; 冻融劣化; 损伤本构

中图分类号: TU502; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2019)01-0102-07

Study on the dynamic elastic-plastic damage of freeze-thaw deteriorated concrete under uniaxial compression

WU Cong¹, PENG Gang^{1,2}

(1. China College of Civil Engineering & Architecture, Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in Three Gorges Area, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to find out the dynamic uniaxial compressive damage characteristics of concrete in different freeze-thaw degrees, the concrete dynamic uniaxial compression tests with different freeze-thaw cycles(0 time, 10 times, 20 times, 30 times, 40 times) are carried out. The results show that the dynamic uniaxial compression damage evolution of freeze-thaw deteriorated concrete can be described well by the improved elastic-plastic damage constitutive model. The damage accumulation and development of stiffness degradation and plastic deformation are basically in sync during the evolution of dynamic uniaxial compression damage of freeze-thaw deteriorated concrete. The damage development of concrete could be slow down with the increase of strain rate, while the threshold of concrete damage development could be improved. At the same strain rate, the characteristic difference between different stages of concrete damage evolution would be of more significance and the damage rate would be greater with the lower degree of freeze-thaw deterioration.

Key words: dynamic property; strain rate; freezing-thawing deterioration; damage constitutive model

水、温度等自然环境与人为因素的影响,会使混凝土材料在不断的冻融循环中产生损伤,加之地震等地质灾害的共同作用,会进一步导致建筑物发生破坏。因此对冻融劣化混凝土动态力学性能及损伤特性的研究就显得极为重要。国内外研究人员对混凝土材料动态损伤机理及冻融劣化机理作出了大量的研究工作^[1-12]。

由于只有可恢复的弹性变形不会造成混凝土材料损伤,因此之前众多学者提出的基于刚度退化现象并通过计算混凝土耗散能而推导出的损伤本构模

型并不能完全真实地表征混凝土损伤演化过程。

本文将构建考虑刚度退化与塑性变形共同作用的弹塑性损伤本构模型,分析混凝土损伤演化过程中损伤积累与刚度退化、塑性变形发展之间的关系深入研究应变速率及冻融劣化程度对混凝土损伤演化的影响规律及相关机理。

1 试验内容

1.1 试验设备

本文所用冻融设备为 TR-TSDRSL 冻融仪,该

收稿日期: 2018-05-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579139)

作者简介: 吴聪,男,硕士,研究方向为混凝土材料动力性能及结构抗震。E-mail:524969157@qq.com

通讯作者: 彭刚,男,教授,博导,研究方向为混凝土材料动力性能及结构抗震。E-mail:gpeng159@126.com

仪器可以实现对混凝土试件的快速冻结,试验加载设备选用 10 MN 多功能动静力三轴仪电液伺服系统,该设备可实现多种加载方式控制,并且能够实现试验数据的实时采集、存储及处理。

1.2 试件制备及养护

本文试验采用尺寸 300 mm 立方体 C30 混凝土试件,制作混凝土试件时采用二次投料法。试件用钢模浇筑后振捣密实,静置 48 h 后拆模,并立即放入标准养护室养护 28 d。浇筑用水泥使用 P·C 32.5 复合硅酸盐水泥。依据相关混凝土配合比规程^[13]进行配合比设计,具体配合比为水:水泥:细骨料:粗骨料=0.46:1.00:1.45:3.37,其级配曲线见图 1。

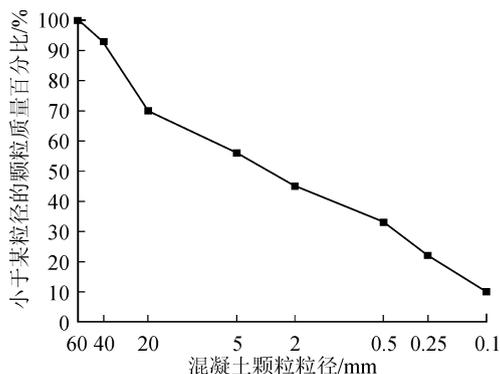


图 1 混凝土级配曲线

Fig.1 Grading curve of concrete

1.3 试验过程

1) 试件冻融循环。将混凝土试件放入试件盒中并灌满水,浸泡至少 12 h,使混凝土试件处于饱水状态。之后将试件盒放入冻融箱内进行冻融循环试验。将试件中心的最低和最高温度分别控制在 $(-17 \pm 2)^\circ\text{C}$ 和 $(8 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。当达到所需的冻融循环次数之后即可取出试件。

2) 试验加载。安装试件,使试件与上方传力柱对中,安装位移计。开启辅助伺服油压进行预加载,预加载的荷载值为 20 kN,预加载速度先快后慢。正式加载时首先加油压,之后发送设置好的加载程序指令进行加载。试验加载采用位移控制,同时采用变形数据作为对比参考。

3) 卸载及后续处理。卸载阶段稳定卸载,使试件保持破坏时原样,清理残渣及试件,检查仪器运行状态以保证试件的有效性。并及时对试验数据进行保存。

2 冻融劣化混凝土动态轴压力学性能

本文进行了 4 种应变速率 (10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 10^{-3} s^{-1}) 及 5 种冻融循环次数 (0 次、10 次、20 次、30 次、40 次) 下的混凝土轴压试验,得到不同工况下应力应变曲线见图 2,混凝土基本力学参数见表 1。

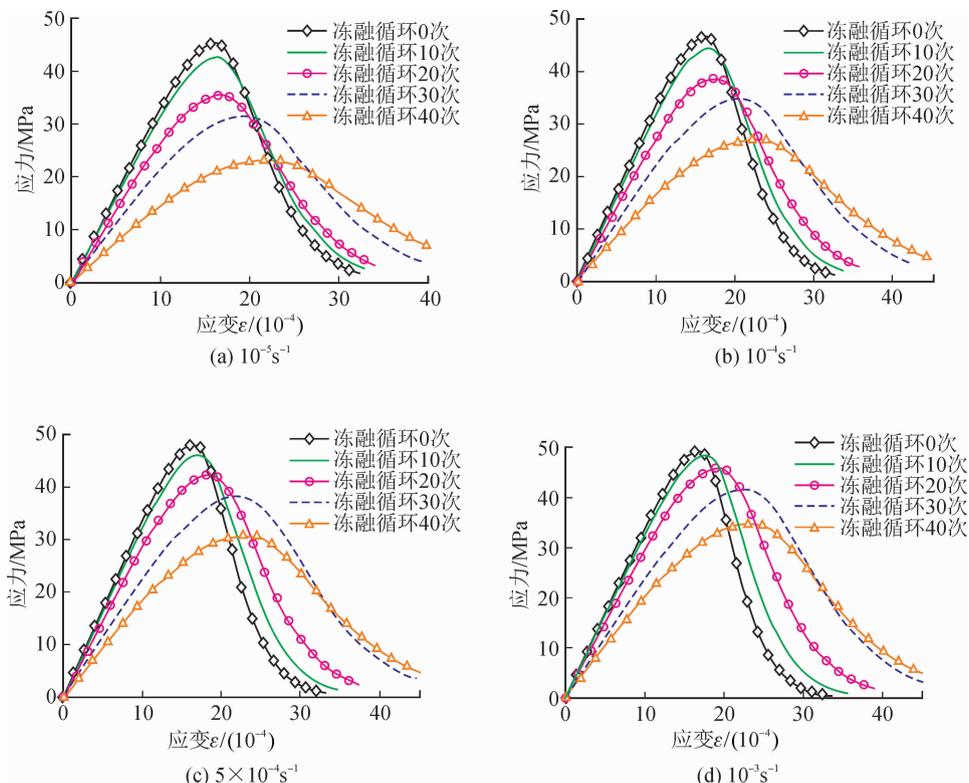


图 2 不同工况下混凝土应力应变曲线

Fig.2 Stress-strain curve of concrete under different working conditions

表 1 不同工况下混凝土基本力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of concrete under different working conditions

应变 速率/s ⁻¹	各冻融循环次数下的轴压强度(MPa)/峰值应变(10 ⁻⁴)/弹性模量(GPa)				
	0 次	10 次	20 次	30 次	40 次
10 ⁻⁵	45.35/ 16.17 / 33.1	42.59/ 16.43 / 32.0	35.43/ 17.03 / 27.3	31.47/ 19.62 / 22.4	23.17/ 22.54 / 15.4
10 ⁻⁴	46.74/ 16.33 / 33.4	44.32/ 16.86 / 32.3	38.73/ 17.86 / 28.3	34.79/ 21.12 / 22.7	27.06/ 23.01 / 17.2
5×10 ⁻⁴	48.10/ 16.58 / 33.6	46.22/ 17.34 / 32.6	42.35/ 18.71 / 29.2	38.18/ 22.65 / 22.9	30.85/ 23.51 / 18.8
10 ⁻³	49.30/ 16.82 / 33.7	48.28/ 17.76 / 32.9	45.83/ 19.53 / 30.1	41.58/ 23.07 / 24.1	34.69/ 23.81 / 20.5

由上文可以看出,不同应变速率下混凝土应力应变曲线随冻融循环次数的增加表现出相同的变化规律。混凝土动态轴压强度与弹性模量均随冻融循环次数的增加而降低,这是由于随着混凝土经历冻融循环次数的增加,混凝土内部裂隙增多,进而导致混凝土初始刚度的降低与承载能力的减弱,使混凝土强度与弹性模量减小。

经历不同冻融循环次数的混凝土轴压强度、峰值应变与弹性模量均随着应变速率的增大而增大,原因在于随着应变速率的提高,混凝土材料内部裂缝扩展所需的能量会随着裂缝扩展路径的增长而急剧增大,因而在较高应变速率条件下,混凝土内部裂缝的发展会选择最短路径而直接穿过强度与弹性模量更高的粗骨料,使得材料变形中弹性变形的比例有所提高,进而导致混凝土材料宏观层面上强度、峰值应变与弹性模量的增大。

3 损伤本构模型研究

3.1 弹塑性损伤本构模型构建

由损伤力学的能量损伤理论可知,混凝土材料的损伤演化是一种能量转化的不可逆过程^[14]。当材料处于弹性变形阶段时,外力做功将完全转化为可恢复的弹性应变能,混凝土材料不会产生任何损伤,此时刚度退化并未开始进行,在这一时期混凝土卸载之后不会有残余应变产生。

随着应力水平的进一步提高,材料将进入非弹性变形阶段,外力做功的一部分将被转化为不可逆的塑性应变能与未被材料吸收的耗散能,耗散能会在加载过程中不断被释放,宏观上表现为材料刚度的退化与塑性变形的增加。因而混凝土的损伤能量可以定义为塑性应变能 W_p 与耗散能 W_s 之和,并且认为只有弹性应变能不会引起混凝土损伤,故:

$$\begin{aligned} W_D &= W_s + W_p = \\ W_{Perf} - W_E &= E_0 \epsilon^2 / 2 - \sigma^2 / (2E_r) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: W_{Perf} 为外力做功; W_E 为弹性应变能; E_0 为初始弹性模量; E_r 为混凝土受压过程中某一点卸载及再加载路径上的弹性模量, E_r 求解公式为:

$$E_r = \sigma / (\epsilon - \epsilon_p) \quad (2)$$

式中: ϵ_p 为塑性应变,参照《混凝土结构设计规范》^[15],塑性应变(残余应变)求解公式为:

$$\begin{cases} \epsilon_{ca} = \max\left(\frac{\epsilon_{pk}}{\epsilon_{pk} + \epsilon}, \frac{0.09\epsilon}{\epsilon_{pk}}\right) \sqrt{\epsilon_{pk}\epsilon} \\ \epsilon_p = \epsilon - \left[\frac{(\epsilon + \epsilon_{ca})\sigma}{\sigma + E_0 \epsilon_{ca}}\right] \end{cases} \quad (3)$$

因此可以得到混凝土损伤变量 D 为:

$$D = \frac{W_D}{W_{Perf}} = \frac{\frac{1}{2} E_0 \epsilon^2 - \frac{\sigma^2}{2E_r}}{\frac{1}{2} E_0 \epsilon^2} = 1 - \frac{\sigma^2}{E_0 E_r \epsilon^2} \quad (4)$$

王乾峰^[16]提出使用 Weibull 统计分布模型来描述混凝土轴压本构曲线上段,采用 Lognormal 描述混凝土轴压本构曲线下段,其最终采用的本构模型表达式为:

$$\sigma = \begin{cases} E_0 \epsilon \left\{ \exp\left[-\frac{1}{m} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{pk}}\right)^m\right] \right\}, & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{pk} \\ \sigma_{pk} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{\ln(\epsilon/\epsilon_{pk})}{t}\right]^2\right\}, & \epsilon \geq \epsilon_{pk} \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_{pk} 与 ϵ_{pk} 分别为峰值应力与峰值应变, m 与 t 分别为模型上升段与下降段形状控制参数。

将式(5)代入式(4)可得如下表达式:

$$D = \begin{cases} 1 - \frac{E_0}{E_r} \exp\left[-\frac{2}{m} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{pk}}\right)^m\right], & 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{pk} \\ 1 - \frac{\sigma_{pk}^2}{E_0 E_r \epsilon^2} \exp\left\{-\left[\frac{\ln(\epsilon/\epsilon_{pk})}{t}\right]^2\right\}, & \epsilon \geq \epsilon_{pk} \end{cases} \quad (6)$$

利用式(5),对不同工况下混凝土应力应变数据进行拟合得到本构模型形状控制参数 m 和 t 的数值,并代入式(6)即可作出混凝土弹塑性损伤演化曲线。本构模型形状控制参数见表 2。

表2 混凝土动态损伤本构模型形状控制参数
Tab.2 Shape control parameters of concrete dynamic damage constitutive model

应变速率/s ⁻¹	各冻融循环次数下的上升段形状控制参数 <i>m</i> /下降段形状控制参数 <i>t</i>				
	0次	10次	20次	30次	40次
10 ⁻⁵	6.013/ 0.270	4.740/ 0.293	3.695/ 0.318	3.014/ 0.341	2.462/ 0.366
10 ⁻⁴	6.428/ 0.255	4.833/ 0.279	3.766/ 0.303	3.140 / 0.326	2.630/ 0.350
5×10 ⁻⁴	6.879/ 0.240	5.005/ 0.264	3.932/ 0.288	3.278/ 0.311	2.769/ 0.335
10 ⁻³	7.181/ 0.225	5.274/ 0.249	4.060/ 0.273	3.432/ 0.297	2.920/ 0.321

由表2可以看出,模型上升段形状控制参数 *m* 会随着应变速率的增大而增大,并随着冻融循环次数的增加而减小;而下降段形状控制参数 *t* 则会随着应变速率的增大而减小,随着冻融循环次数的增加而增大。

因此提出关于上升段参数 *m* 与下降段参数 *t* 的计算表达式如下:

$$m \text{ 或 } t = a + b \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right) + cN \quad (7)$$

式中: $\dot{\epsilon}_d$ 与 $\dot{\epsilon}_s$ 分别为动态应变速率与静态应变速率, *N* 为冻融循环次数,通过拟合得到相关拟合参数见表3。

表3 混凝土损伤本构模型控制参数拟合参数
Tab.3 Fitting parameters of concrete damage constitutive model control parameters

模型参数	拟合参数			相关系数
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	
<i>m</i>	5.897	0.198	-0.096	0.968
<i>t</i>	0.270	-0.015	0.002 4	0.983

3.2 冻融劣化混凝土损伤演化规律分析

由于本文试验工况较多,仅以应变速率 10⁻³ s⁻¹ 下4种不同冻融循环次数(10次、20次、30次、40次)的损伤演化曲线为例进行分析,并作出相应的损伤演化及刚度退化、塑性发展曲线见图3。

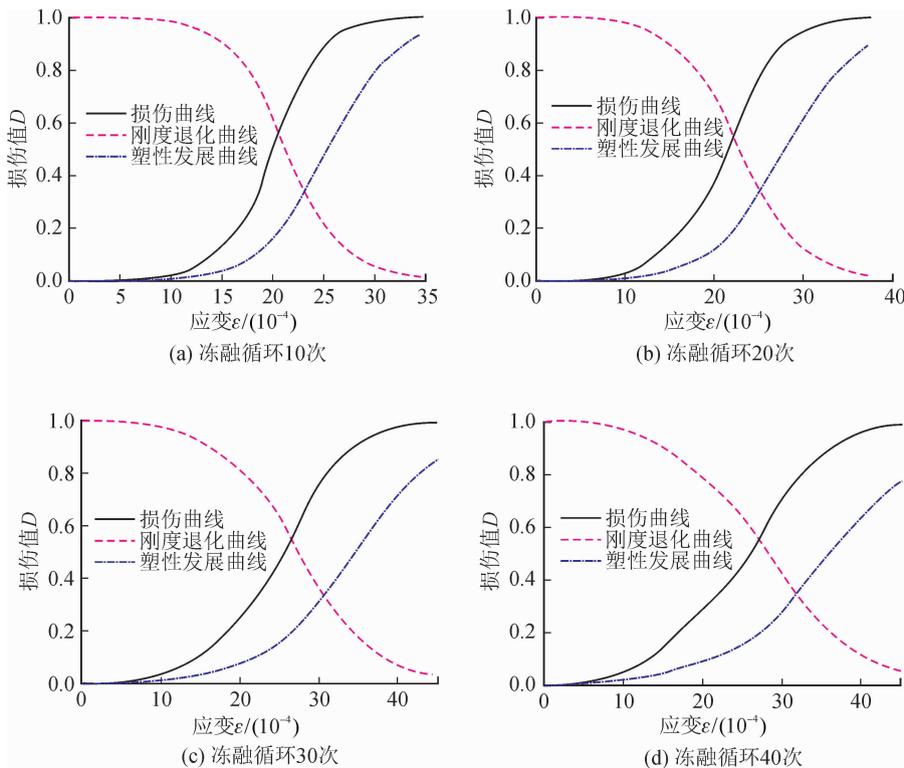


图3 应变速率 10⁻³ s⁻¹、不同冻融循环次数下混凝土损伤演化曲线

Fig.3 Damage evolution curve of concrete under different freezing-thawing cycles at different strain rates of 10⁻³ s⁻¹

从图3可以看出,冻融劣化混凝土动态轴压损伤演化过程中,损伤积累与刚度退化和塑性变形发展基本保持同步。混凝土在受压过程中损伤演化明显具备3阶段发展特征,即①损伤初始积累阶段;②损伤突发积累发展阶段;③损伤完全发展阶段;其对应的损伤发展速度可表现为平稳发展—加速发展—减速发展—停止发展。

随着冻融循环次数的增加,混凝土材料冻融劣化程度在加深,损伤演化与刚度退化三个发展阶段的差异显著减小,混凝土会更早开始产生损伤,因而损伤曲线会更早出现上升,刚度退化曲线也会更早出现下降;由于混凝土内部裂隙的增多,加载前期材料要经历较长的压密阶段,因此在达到相同损伤变量时,混凝土材料产生的不可恢复的塑性变形也会

更小,使得塑性指数减小,导致损伤曲线与塑性发展曲线之间的间隔变大。

当应力达到峰值点时,材料基本发生破坏,损伤值接近最大值,之后仅有少量的损伤产生。当损伤值达到最大值时,刚度退化也已完成,混凝土材料完全丧失承载能力。此时塑性变形加快发展,而塑性指数并未达到最大值,表明此时混凝土材料仍具有少量的可恢复的弹性变形。

4 不同工况下损伤曲线比较

4.1 不同应变速率下混凝土损伤曲线比较

分别作出4种冻融循环次数(10次、20次、30次、40次)下不同应变速率(10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 10^{-3} s^{-1})的损伤演化曲线,见图4。

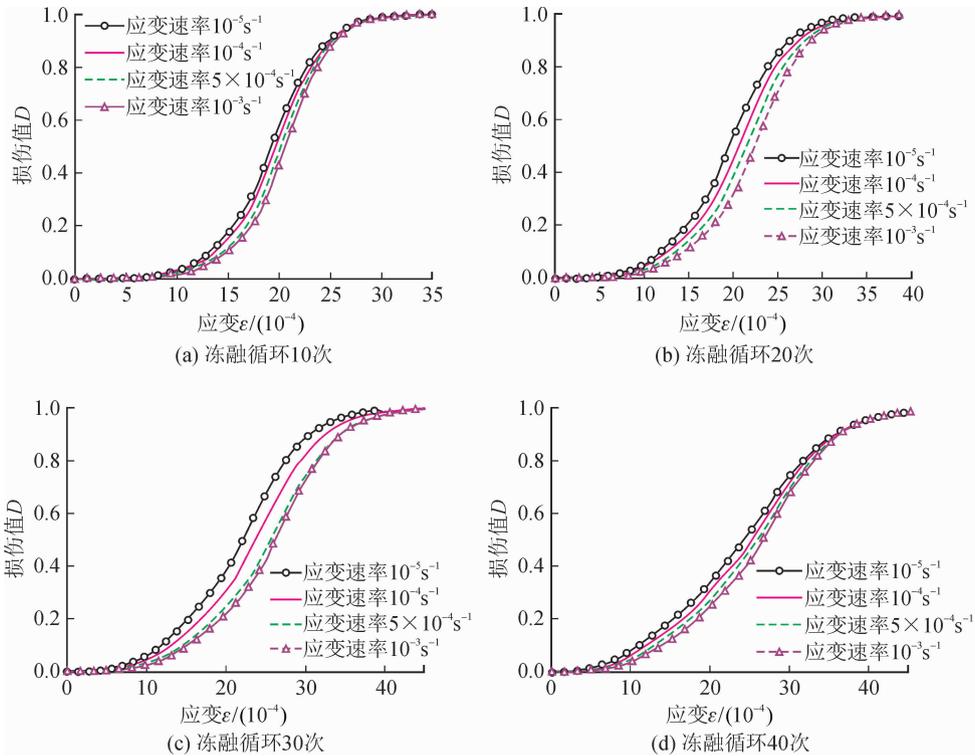


图4 相同冻融循环次数、不同应变速率下损伤演化曲线

Fig. 4 Damage evolution curve at different strain rates under same freezing-thawing cycles

由图4可知,相同冻融循环次数下不同应变速率的混凝土损伤演化曲线形状基本一致,当冻融循环次数较小时,混凝土损伤全过程表现出明显的三阶段变化特征,即损伤发展速度从平缓发展到加速发展再到减速发展,直至最终停止发展,损伤值达到最大,混凝土材料发生完全破坏。

随着应变速率的提高,损伤发展会产生延缓,这是因为在较高应变速率下裂缝并没有选择从薄弱的骨料-水泥砂浆粘结界面处穿过,而是选择直接穿过吸能能力更强的粗骨料。从而阻碍了裂缝的持续化

扩展,提高了混凝土的有效受力面积,抑制了材料的刚度退化,减小了非弹性变形的产生,使得外力做功更多地被转化为弹性应变能,进而从宏观上推迟了混凝土损伤的演化。

同时在较低应变速率下,试件内部裂缝间的水会对裂缝产生“楔入作用”,促进裂缝的发展并导致损伤变量增大。而随着应变速率的提高,混凝土裂缝扩展速度会高于试件内部裂缝间水头的渗透速度,水的惯性力与粘滞力对裂缝的发展产生阻碍作用,减缓损伤的演化^[17]。并且随着冻融循环次数的

增加,混凝土内部因裂隙的增多而会吸收更多的水分,水的“楔入作用”与“粘阻作用”增强,混凝土损伤演化的应变速率敏感性会更加显著。

4.2 不同冻融劣化程度混凝土损伤曲线比较

作出4种应变速率(10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 10^{-3} s^{-1})下不同冻融循环次数(0次、20次、30次、40次)的损伤演化曲线,见图5。

由图5可以看出,相同应变速率下的不同冻融劣化程度的混凝土损伤演化曲线的形状有很大差

异。经历更多冻融循环次数的混凝土材料,混凝土损伤演化的阈值会逐渐变小,一方面是由于冻融劣化作用使混凝土材料产生了一定量的初始损伤,使混凝土材料初始刚度降低;另一方面混凝土试件内部的裂缝数量会随着冻融循环次数的增加而变大,这有利于刚度退化的发生,并且会缩小混凝土承载变形的弹性区间,使得不可恢复的塑性变形进一步增大。因而混凝土材料会更早发生损伤,这与前文的结论相一致。

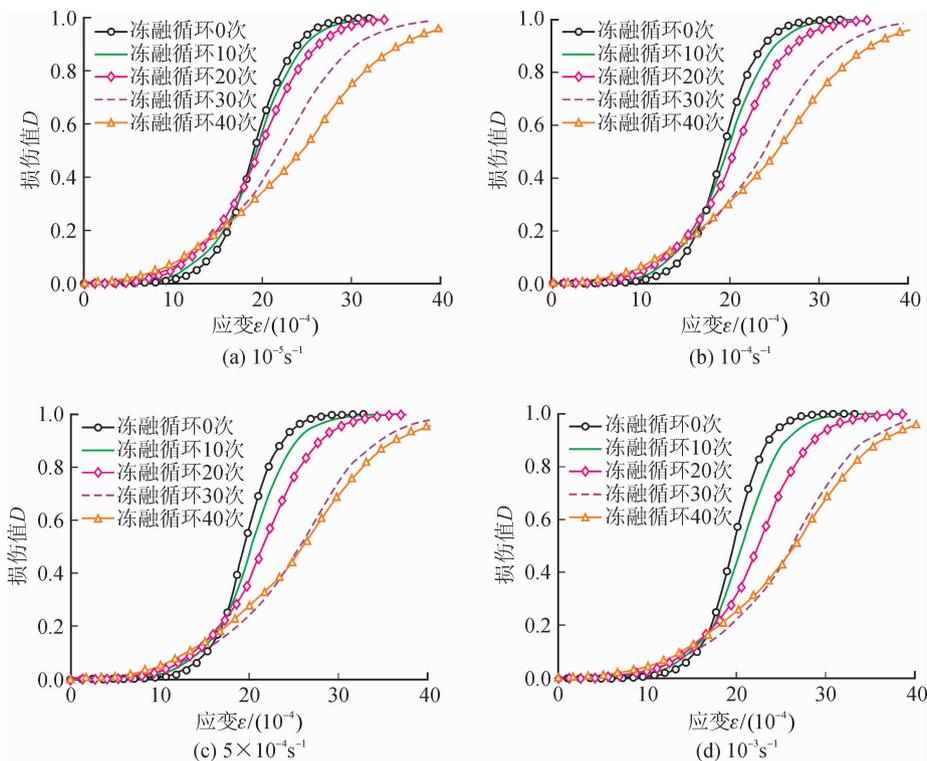


图5 相同应变速率、不同冻融循环次数下损伤演化曲线

Fig. 5 Damage evolution curve in different freezing-thawing cycles under same strain rate

冻融劣化程度较低的混凝土损伤破坏不同阶段的特征差异会更加明显,这是由于其承载过程中混凝土材料会经历受压密实-形成细小裂缝-裂缝生长及新裂缝生成-裂缝贯通、材料发生破坏的过程^[18],宏观层面上损伤发展速度可明显表现为平稳缓慢-加速变快-减速变慢-停止。

而冻融劣化程度较高的混凝土,试件内部较多的初始裂隙更有利于刚度退化与塑性变形发展的进行,已有裂缝更容易沿着薄弱粘结界面扩展,新裂缝也更易萌生,裂缝持续化扩展进程将更加平顺,因而其承载全过程中不同阶段的损伤发展速度会更为趋近,不同阶段损伤演化差异减小。

5 结论

1) 本文构建的考虑刚度退化与塑性变形的弹

塑性损伤本构模型可以很好地表征冻融劣化混凝土动态轴压损伤演化特性,模型上升段形状控制参数 m 与下降段形状控制参数 t 均与应变速率、冻融循环次数表现出很好的线性相关关系。

2) 冻融劣化混凝土动态轴压损伤演化过程中,损伤积累与刚度退化和塑性变形发展基本保持同步。在达到相同的损伤值时,混凝土产生的塑性变形会随着冻融劣化程度的加深而减小。当混凝土完全丧失承载能力时,材料仍具有少量的可恢复的弹性变形。

3) 相同冻融循环次数、不同应变速率下的混凝土损伤曲线形状基本一致,应变速率的提高会在一定程度上减缓混凝土材料的损伤演化,提高混凝土损伤演化的初始阈值。

4) 不同冻融劣化程度的混凝土损伤演化过程

会有很大区别,经历较低次数冻融循环的混凝土,其损伤演化三个阶段特征差异更加明显,而经历过较多次冻融循环的混凝土承载过程中损伤发展速度更加趋近,并且会更早开始产生损伤。

参考文献:

- [1] MARZEC I, TEJCHMAN J. Computational modelling of concrete behaviour under static and dynamic conditions [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences, 2013, 61(1):85-96.
- [2] ERZAR B, FORQUIN P. Analysis and modelling of the cohesion strength of concrete at high strain-rates [J]. International Journal of Solids and Structures, 2014, 51(14):2559-2574.
- [3] LU Dechun, WANG Guosheng, DU Xiuli, et al. A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate strength of concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 103:124-137.
- [4] WU Jin, JING Xianhang, WANG Zhe. Uni-axial compressive stress-strain relation of recycled coarse aggregate concrete after freezing and thawing cycles[J]. Construction and Building Materials, 2017, 134:210-219.
- [5] 姚泽良,段东旭,党发宁,等. 基于随机骨料模型的再生混凝土单轴压缩数值模拟[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(4):475-480.
- YAO Zeliang, DUAN Dongxun, DANG Faning, et al. Numerical simulation of recycled concrete under uniaxial compression based on random aggregate model [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(4):475-480.
- [6] MAZARS J, GRANGE S. Simplified strategies based on damage mechanics for concrete under dynamic loading[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2017, 375(2085):20160170.
- [7] GENG Jishi, SUN Qiang, ZHANG Yuchun, et al. Studying the dynamic damage failure of concrete based on acoustic emission[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149:9-16.
- [8] 田威,邢凯,谢永利. 冻融环境下混凝土损伤劣化机制的力学研究[J]. 实验力学, 2015, 30(3):299-304.
- TIAN Wei, XING Kai, XIE Yongli. Experimental study of damage degradation mechanism of concrete in freeze-thaw environment [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(3):299-304.
- [9] 徐童淋,彭刚,杨乃鑫,等. 饱和混凝土循环和灾后动态抗压性能研究[J]. 西安理工大学学报, 2017, 33(4):469-475.
- XU Tonglin, PENG Gang, YANG Naixin, et al. Studies of the dynamic uniaxial compressive properties of saturated concrete after mechanical cyclic loading [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2017, 33(4):469-475.
- [10] 柳琪,彭刚,徐童淋,等. 冻融劣化混凝土循环加卸载外包络线及能量演化[J]. 水利水运工程学报, 2017, (7):85-91.
- LIU Qi, PENG Gang, XU Tonglin, et al. Study of outer envelope curve and energy evolution for freeze-thaw deteriorated concrete under cyclic loading and unloading test [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, (7):85-91.
- [11] 任晓丹,李杰. 混凝土损伤与塑性变形计算[J]. 建筑结构, 2015, 45(2):29-31.
- REN Xiaodan, LI Jie. Calculation of concrete damage and plastic deformation [J]. Building Structure, 2015, 45(2):29-31.
- [12] 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. Experimental study on compression damage experiment of concrete at different strain rate [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(3):40-45.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ55-2011 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.
- [14] 罗曦,彭刚,刘博文,等. 用改进 Najar 能量法分析混凝土单轴受压损伤特性[J]. 水利水运工程学报, 2016, (5):103-108.
- LUO Xi, PENG Gang, LIU Bowen, et al. Analysis of damage characteristics of concrete under dynamic uniaxial compression based on improved Najar energy method [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016, (5):103-108.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [16] 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. Study on dynamic damage characteristics of steel fiber concrete [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2009.
- [17] 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.
- [18] 王燕. 冻融环境下混凝土力学行为及结构抗震性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2017.
- WANG Yan. Study on mechanical behavior and seismic behavior of concrete in freeze-thaw environment [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.