

文章编号:1007-9629(2023)02-0143-07

冻融循环后蒸汽养护混凝土的损伤-声发射特性

陈波^{1,2,*}, 袁志颖^{1,2}, 陈家林^{1,2}, 徐波³

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:为研究冻融循环对蒸汽养护混凝土力学性能演化规律的影响,通过开展蒸汽养护混凝土试件冻融循环试验和单轴压缩-声发射试验,分析了冻融循环作用后不同蒸汽养护制度下混凝土加载损伤破坏声发射过程,依据声发射特征参数建立了冻融循环后蒸汽养护混凝土受压损伤本构模型,探究了损伤变量与冻融循环次数的变化关系.结果表明:60、80℃蒸汽养护对混凝土抗冻性能不利,40℃蒸汽养护混凝土与标准养护混凝土抗冻性能无明显差异;混凝土受压破坏过程的声发射振铃计数变化呈现出明显的接触期、平静期、陡增期三阶段变化规律,平静期-陡增期分界点随冻融循环次数的增加在时间上发生后移;受压过程前期,蒸汽养护混凝土损伤发展较为缓慢;相对峰值应力达到0.8以后,蒸汽养护混凝土损伤发展较为迅速,直至受压破坏.

关键词:蒸汽养护混凝土;冻融循环;声发射;损伤特性

中图分类号:TU528.44

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.02.005

Damage-Acoustic Emission Characteristics of Steam-Cured Concrete after Freeze-Thaw Cycles

CHEN Bo^{1,2,*}, YUAN Zhiying^{1,2}, CHEN Jialin^{1,2}, XU Bo³

(1. College of Water-Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: To study the influence of freeze-thaw cycles on the evolution of mechanical properties of steam-cured concrete, the freeze-thaw cycles test and uniaxial compression-acoustic emission test of steam-cured concrete specimens were carried out to analyze the damage characteristics of concrete under different steam-curing systems after the action of freeze-thaw cycles. According to the characteristic parameters of acoustic emission, a constitutive model of steam-cured concrete compression damage was established under freeze-thaw cycle, and the relationship between damage variables and the number of freeze-thaw cycles was discussed. The results show that steam-curing temperature of 60 °C and 80 °C is inconvenient for the frost resistance of concrete, and there is no significant difference between steam-cured concrete at 40 °C and standard-cured concrete in frost resistance. The change of the cumulative acoustic emission (AE) ringing count in the process of concrete compression failure shows obviously changes in three-stages, i.e., in contact stage, quiet stage and spike stage. The demarcation point between quiet stage and spike stage shifts backward in time with increase of freeze-thaw cycles. In the early stage of the compression process, the damage of steam-cured concrete develops slowly. After the relative peak stress reaches 0.8, the damage of steam-cured concrete develops more rapidly until it fails under compression.

Key words: steam-cured concrete; freeze-thaw cycle; acoustic emission; damage characteristic

收稿日期:2021-12-05; 修订日期:2022-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52079049); 国家自然科学基金重点项目(51739003)

第一作者(通讯作者):陈波(1986—),男,浙江绍兴人,河海大学教授,博士生导师,博士.E-mail: chenbo@hhu.edu.cn

蒸汽养护是混凝土预制构件生产时常用的养护方式,它能显著提高混凝土的早期强度,加快模具周转速率,从而提高施工效率^[1-2]。但是,蒸汽养护下的高温、高湿条件会造成混凝土内部孔隙粗化、膨胀变形及脆性增大等热损伤效应,对混凝土的抗冻耐久性不利^[3-5]。国内外学者对混凝土抗冻性进行了大量的研究,也取得了不少成果^[6-10]。然而,目前混凝土抗冻性研究主要是针对常温养护的混凝土,蒸汽养护混凝土的抗冻性并未受到相应重视,尤其是对冻融循环下蒸汽养护混凝土的应力应变行为及冻融循环作用造成的材料耐久性损伤认识不足。

混凝土材料受外荷载作用发生变形破坏时,常伴随着声发射现象,其声发射信号蕴含着混凝土内部破裂过程的丰富信息。依据声发射信号特征参数可对冻融循环后混凝土内部损伤动态演化过程进行实时监测^[11]。

本文通过开展不同蒸汽养护制度下混凝土的冻融循环试验,探究了蒸汽养护混凝土在不同冻融循环次数下的物理力学性能变化规律,并通过单轴压缩-声发射试验,分析了不同冻融循环次数下蒸汽养护混凝土声发射参数动态变化特征。同时,依据声发射累计事件数,并结合损伤力学基本理论,建立了冻融循环下蒸汽养护混凝土受压损伤本构模型,定量评价了不同蒸汽养护制度下混凝土的抗冻性能,以为蒸汽养护混凝土冻融环境健康服役提供技术支撑。

1 试验

1.1 原材料

P·O 42.5 普通硅酸盐水泥(C); II 级粉煤灰(FA); S95 型矿渣粉(GGBS); 粗骨料采用直径为 5~25 mm 连续颗粒级配碎石(CA); 细骨料采用天然河砂(S), 级配符合 II 区要求, 细度模数为 2.5; 减水剂为高效聚羧酸型减水剂(WR), 减水率(质量分数, 本文涉及的掺量、比值等均为质量分数或质量比)达 30% 以上。

1.2 试件的配合比与养护制度

试件的水灰比为 0.3, 配合比 $m_C:m_{FA}:m_{GGBS}:m_{WR}:m_{CA}:m_S=241.50:144.90:96.60:3.42:957.00:815.00$ 。对浇筑成型后的试件分别进行标准养护和蒸汽养护。蒸汽养护制度为: 试件在标准养护室静停 3 h 后, 放入蒸汽养护箱中, 设置蒸汽养护温度 t 为 40、60、80 °C, 升温、降温速率均为 15~20 °C/h, 恒温时间为 12 h, 养护结束后脱模。将标准养护和蒸汽养护试件放入标准养护室养护至 28 d 龄期, 从养护箱中取出,

放置在室内自然条件下继续养护至 180 d。根据蒸汽养护温度, 将蒸汽养护试件命名为 ZF-40、ZF-60、ZF-80; 标准养护试件命名为 BF。

1.3 试验方法

1.3.1 冻融循环试验

采用 CABR-HDK 型快速冻融试验机, 根据 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中的快冻法进行蒸汽养护混凝土冻融循环试验。试验设定冻融循环次数 $n=0、40、80、120、160$ 次, 每 40 次循环结束后进行质量、弹性模量、抗压强度测试。质量和弹性模量测试试件均为 100 mm×100 mm×400 mm 的棱柱体, 抗压强度测试试件为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体。

1.3.2 单轴压缩-声发射试验

蒸汽养护混凝土单轴抗压试验采用 WAW-1000 电液伺服万能试验机, 加载方式为荷载控制。综合考虑电液伺服万能试验机的性质和 SL352—2006《水工混凝土试验规程》的要求, 设置常规加载速率为 3 kN/s。

声发射采集系统采用美国生产的 Sensor Highway III 型声发射仪, 前置放大器增益选为 40 dB。为提高数据的可靠性和定位的准确性, 在混凝土试件侧面对称布置 4 个传感器(见图 1)。

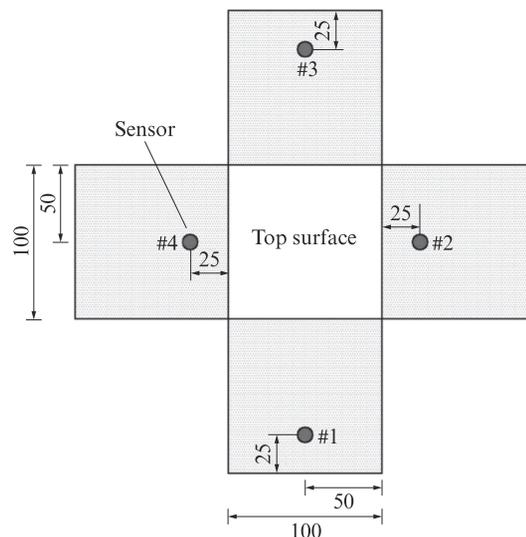


图1 传感器布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor layout (size: mm)

2 结果与讨论

2.1 物理力学性能分析

不同冻融循环次数下混凝土的质量损失率和抗压强度损失率见图 2。由图 2(a)可见: 当 $n < 40$ 次时, 混凝土的质量随冻融循环次数的增加而增大, 这主要是由于冻融循环初期混凝土内部孔隙吸收水分的

质量大于冻融损失的质量,因而在宏观上表现为混凝土质量增加;当 $n > 40$ 次时,混凝土的质量逐渐开始减小,这是因为随着冻融循环次数的增加,混凝土表面逐渐开始剥落,冻融质量损失增大,超过了孔隙吸收水分的质量,导致混凝土质量开始降低;随着蒸汽养护温度的升高,冻融循环后期混凝土的质量损失率增大,这主要是因为蒸汽养护温度越高,与初始静置温度($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)的温差越大,混凝土内部孔隙结构越粗化,产生的裂缝就越多,在冻融循环后期损失的

质量就越大.由图2(b)可见:蒸汽养护温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,蒸汽养护混凝土在经历不同冻融循环次数后,其强度损失率远高于标准养护混凝土,如 $n=80$ 次时, $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蒸汽养护混凝土的强度损失率分别比标准养护混凝土高 7.89% 、 10.20% ; $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 蒸汽养护混凝土的强度损失率与标准养护混凝土相差不大.这主要是因为过高的蒸汽养护温度使混凝土内部有害孔增多,对孔隙结构的破坏增加,结晶度降低,导致界面过渡区性能变差,混凝土抗冻性能下降.

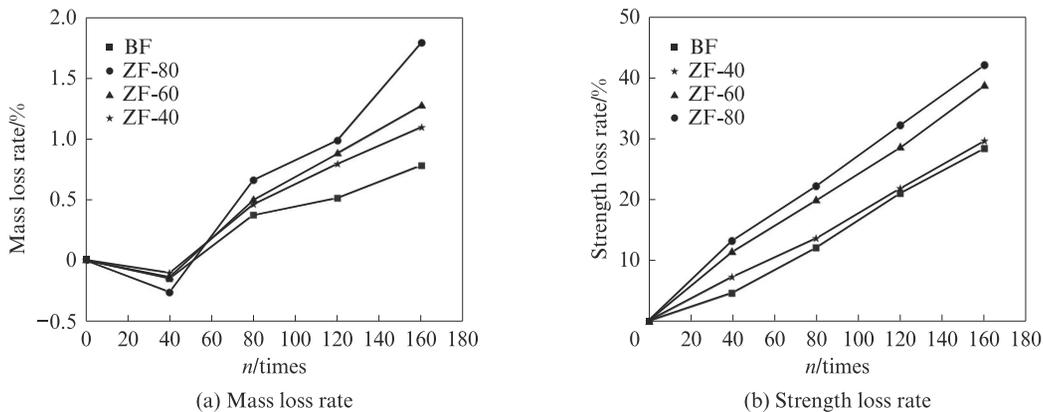


图2 不同冻融循环次数下混凝土的质量损失率和强度损失率

Fig. 2 Mass loss rate and strength loss rate of concretes under different freeze-thaw cycles

2.2 声发射特征分析

不同冻融循环次数下试件 ZF-60 的声发射特征参数见图3(图中: N_r 为振铃计数; N 为声发射累计事件数; L 为荷载).由图3可见:不同冻融循环次数下,混凝土振铃计数随着荷载的增加而发生变化,呈现出试验初期振铃计数增加较快、随后增加速率减缓、接近破坏时振铃计数突增的三阶段规律;混凝土声发射累计事件数峰值随着冻融循环次数的增加先增大后减小, $n=80$ 次时其达到最大值,这是因为随着冻融循环次数的增加,混凝土内部微裂隙的数量不断增加,微裂隙受压破坏时不断释放出弹性波,从而使产生的事件数增多,而到冻融循环后期,微裂隙不断汇聚、贯通,混凝土强度迅速降低,累积的能量不断提前释放,因而在受压过程中传感器捕捉到的声发射事件数变少.

将混凝土冻融循环后的受压破坏过程分为接触期(I)、平静期(II)、陡增期(III)三个阶段.不同阶段试件 ZF-60 振铃计数的平均值见表1.由表1可见:冻融循环作用下,不同阶段混凝土的声发射振铃计数平均值有较大差异.

(1)接触期 接触期主要发生在受压初始阶段,此时振铃计数增加较快,持续时间较短,混凝土表面基本没有变化.这主要是由于压缩试验机加载板和

试件刚接触时,二者之间存在少量空隙,在惯性作用下导致瞬时应力过大,且在加载阶段初期,混凝土内部已有部分孔隙被压密,因而产生了振铃计数增加较快的现象.

(2)平静期 随着荷载的逐渐增大,冻融损伤产生的微裂隙在混凝土局部迅速扩展,在主应力和次生应力作用下不断聚合、贯通,矿物颗粒间的连接破坏,累积的能量不断释放,混凝土内部损伤程度加剧.同时在试验过程中可观察到混凝土表面出现掉屑情况,且冻融循环次数越多,其掉屑情况越严重.

(3)陡增期 随着受压过程的继续进行,试件内部裂隙迅速发展,声发射活动异常活跃,振铃计数陡增,同时可观察到试件表面掉屑非常严重,表明混凝土内部损伤已接近极限.在荷载接近峰值荷载时,试件内部裂缝迅速扩展至表面,形成可见的宏观裂缝,同时可听见混凝土发出剧烈的破裂声,并伴有大量碎片飞出,试件发生破坏.陡增期内振铃计数发生突变,是损伤传导和加剧的重要参照.陡增期是冻融循环下蒸汽养护混凝土强度破坏时间域的前兆信息,此阶段需密切关注监测范围内混凝土结构的稳定状态.

相对声发射累计事件数 N_r 为声发射累计事件数与总声发射累计事件数的比值;相对峰值应力 σ_r 为应力 σ 与峰值应力的比值.不同冻融循环次数下试件

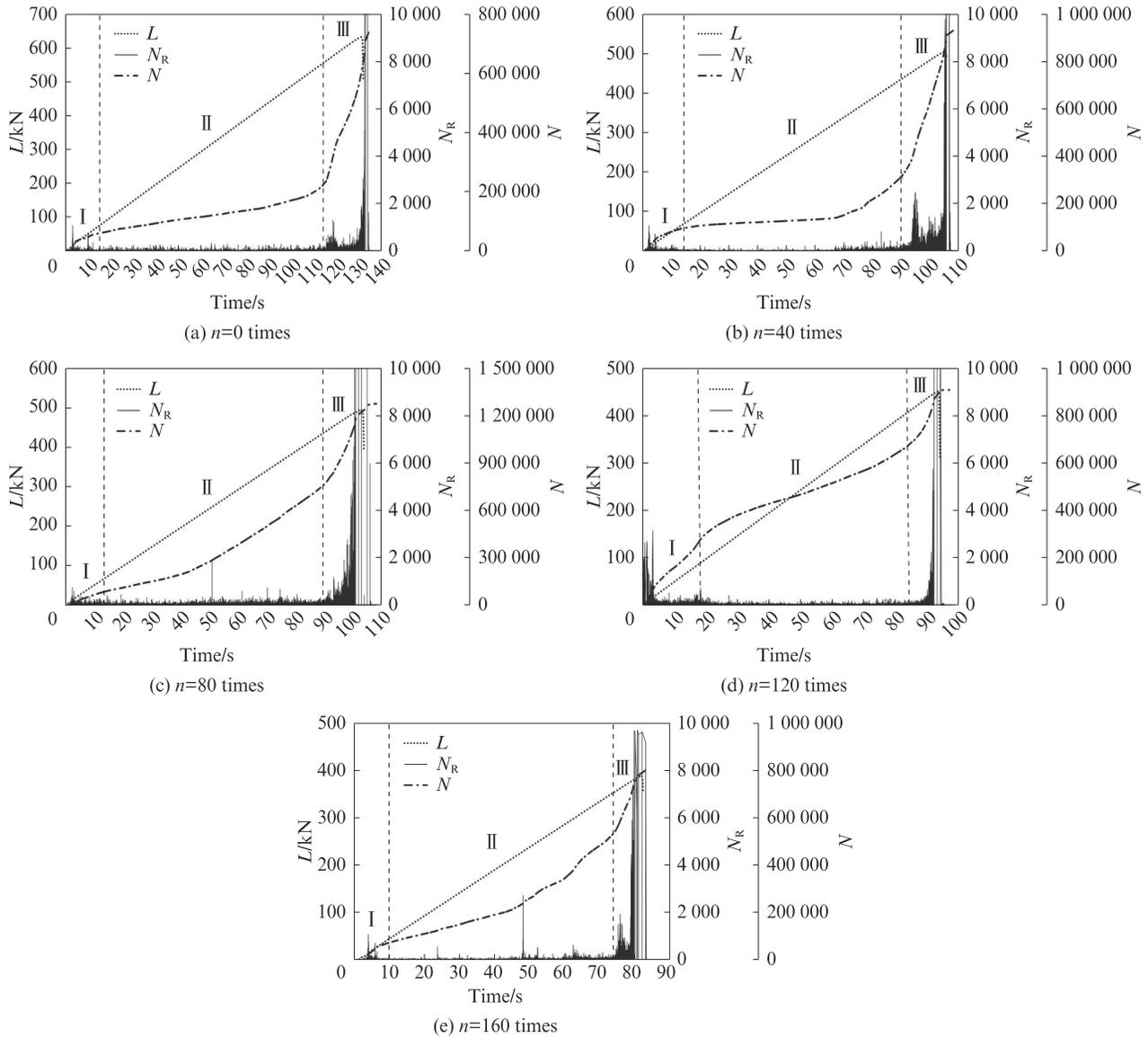


图3 不同冻融循环次数下试件ZF-60的声发射特征参数

Fig. 3 Acoustic emission characteristic parameters of specimen ZF-60 under different freeze-thaw cycles

表1 不同阶段试件ZF-60振铃计数的平均值
Table 1 Average value of ringing counts of specimen ZF-60 at different stages

n/times	Contact stage	Calm stage	Spike stage
0	523	217	5 224
40	738	198	6 457
80	627	322	7 566
120	689	225	6 238
160	786	247	4 853

表2 不同冻融循环次数下试件ZF-60平静期-陡增期分界点的特征参数

Table 2 Characteristic parameters of the boundary point between calm stage and the stage of specimen ZF-60 under different freeze-thaw cycles

n/times	$N_t/\%$	σ_t
0	30.37	0.83
40	33.94	0.85
80	59.84	0.88
120	69.30	0.90
160	71.39	0.91

ZF-60平静期-陡增期分界点的特征参数见表2.由表2可见,当 $n=0\sim 160$ 次时,分界点处相对声发射累计事件数从30.37%增加到71.39%,相对峰值应力从0.83增加到0.91,二者均随着冻融循环次数的增加而增大,这表明平静期-陡增期分界点随着冻融循环次数的增加在时间上发生后移.

声发射幅值可以表征混凝土局部损伤的剧烈程度,当某处损伤越剧烈时,所产生的幅值越高,幅值信号越密集.不同冻融循环次数下试件ZF-60的声发射幅值信号图见图4.由图4可见:加载过程中试件ZF-60的声发射幅值信号存在明显的阶段性,这些现

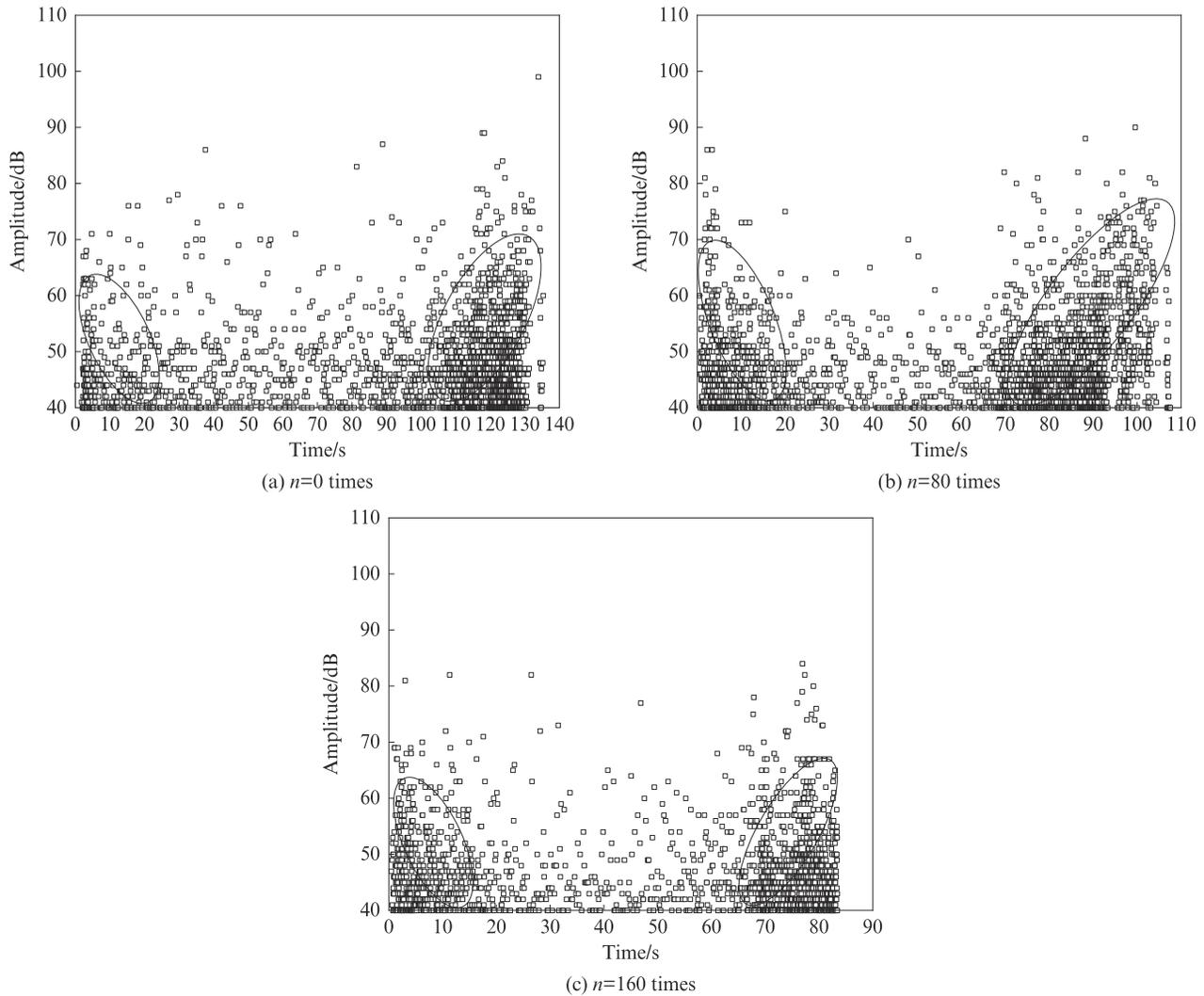


图4 不同冻融循环次数下试件ZF-60的声发射幅值信号图

Fig. 4 Acoustic emission amplitude signal diagrams of specimen ZF-60 under different freeze-thaw cycles

象与声发射振铃计数表现出来的规律一致;在接触期内,由于瞬时应力的作用以及孔隙的闭合与基质之间的接触磨擦,此阶段声发射幅值信号较为密集;在平静期内,混凝土内部主要表现为微裂隙的连通和扩展,损伤程度增加但并未发生明显破坏,此阶段声发射幅值信号较为稀疏;在陡增期内,裂隙迅速发展形成可见的宏观裂缝,并伴随剧烈的结构性损伤,此阶段声发射幅值信号迅速增强,达到峰值。

2.3 受压损伤本构模型

2.3.1 声发射累计事件数与受压损伤模型的建立

Ohtsu^[12]通过对混凝土声发射机理的分析,认为混凝土声发射累计事件数 N 与应力 σ 之间存在如下关系:

$$N = c\sigma^a e^{b\sigma} \quad (1)$$

式中: c 为积分常量; a 、 b 为与混凝土材料损伤特性相关的参数。

纪洪广等^[13]研究发现,在受压过程中,混凝土由

荷载引起的损伤变量 D_c 与声发射累计事件数 N 成正比:

$$D_c = kN \quad (2)$$

式中: k 为比例系数。

龙广成等^[14]指出,在冻融条件下,混凝土总损伤变量 D 包括冻融损伤变量 D_i 和荷载引起的损伤变量 D_c :

$$D = D_i + D_c = D_i + kN \quad (3)$$

同时,根据宏观唯象损伤力学,混凝土宏观物理力学性能能够代表内部劣化程度,将材料的总损伤变量 D 定义为^[15]:

$$D = 1 - \frac{E(\sigma)}{E_0} \quad (4)$$

式中: $E(\sigma)$ 为受压过程中不同应力状态下混凝土的动弹性模量; E_0 为混凝土受压前的初始动弹性模量。

由Lemaitre应变等价性假说可知,应力 σ 作用在损伤材料上产生的应变与有效应力作用在无损伤材料

上引起的应变等价,联立式(1)、(3)、(4),得到冻融循环后蒸汽养护混凝土的受压损伤本构模型:

$$\sigma = E_0 \varepsilon (1 - D_i - D_c) \quad (5)$$

式中: ε 为应变.

2.3.2 冻融循环下蒸汽养护混凝土受压损伤本构模型的验证

以试件 ZF-60 为例,根据试验所得蒸汽养护混凝土声发射累计事件数和应力参数,通过式(1)对不同蒸汽养护制度下的数据进行拟合分析. $n=0$ 次时,试件 ZF-60 的初始冻融损伤变量 $D_{i0}=0$,将拟合所得参数 a 、 b 、 c 值代入式(5),再与实测应力-应变数据进行拟合,得到 $E_0=4.2 \times 10^4$ MPa, $k=1.23 \times 10^{-6}$,相关系数 $R^2=0.978$.将 E_0 值代入式(5),即可得不同冻融循环次数下蒸汽养护混凝土的受压损伤本构模型.分别将 $n=40$ 、 80 、 120 、 160 次时的混凝土试件应力-应变数据与式(5)进行拟合分析,求出不同冻融循环次数下混凝土受压损伤本构模型的 D_i 和参数 k ,并联立式(3)建立蒸汽养护混凝土受压损伤演化方程.不同冻融循环次数下试件 ZF-60 的受压损伤演化过程见图 5.由图 5 可见:受压前期,蒸汽养护混凝土损伤演化较为缓慢;当相对峰值应力达到 0.8 以后,蒸汽养护混凝土损伤发展较为迅速;峰值应力处总损伤变量 D 达到最大值.

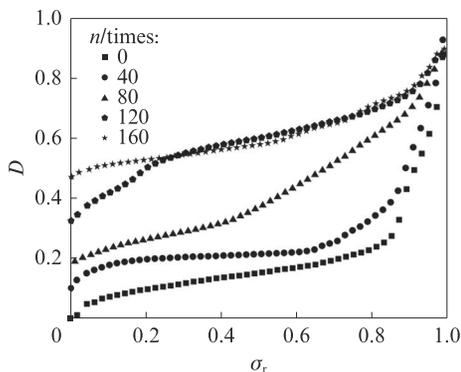


图5 不同冻融循环次数下试件 ZF-60 的受压损伤演化过程
Fig. 5 Evolution process of specimen ZF-60 compression damage under different freeze-thaw cycles

同样,通过上述方法分别建立了试件 BF、ZF-40、ZF-80 在不同冻融循环次数下的受压损伤本构模型,且其模型拟合相关系数 R^2 均在 0.919~0.992.由此可见,通过声发射累计事件数所建立的蒸汽养护混凝土受压损伤本构模型与实测应力-应变数据具有良好的相关性,可较好地描述冻融循环作用后混凝土应力应变关系.

2.3.3 不同蒸汽养护制度下混凝土的冻融损伤评价

为进一步评价不同蒸汽养护制度下混凝土的冻

融损伤,通过前文建立的受压损伤本构模型,求出相对峰值应力为 0 时受压损伤本构模型的初始冻融损伤变量 D_{i0} ,根据其值可以定量评价混凝土的冻融损伤状态.不同蒸汽养护制度下混凝土的初始冻融损伤变量见图 6.由图 6 可见:随着冻融循环次数的增加,不同蒸汽养护制度下试件的初始冻融损伤变量值增大;与标准养护混凝土相比,60、80℃蒸汽养护混凝土在不同冻融循环次数下的初始冻融损伤变量值均更高,且差异较为明显,这表明在该温度下进行蒸汽养护不利于混凝土抗冻性能发展;40℃蒸汽养护混凝土在不同冻融循环次数下初始冻融损伤变量值与标准养护混凝土相近,二者抗冻性能无明显差异.

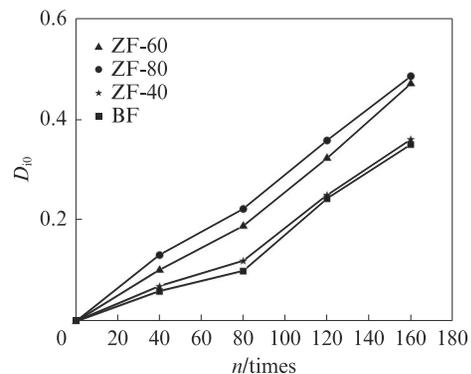


图6 不同蒸汽养护制度下混凝土的初始冻融损伤变量
Fig. 6 D_{i0} of concretes under different steam-curing systems

3 结论

(1)根据声发射振铃计数变化,可将冻融循环后蒸汽养护混凝土受压破坏过程分为接触期、平静期、陡增期三阶段,声发射幅值变化规律与振铃计数变化规律相同.随着冻融循环次数的增加,平静期-陡增期分界点在时间上发生后移,混凝土声发射累计事件数峰值先增大后减小.

(2)通过声发射累计事件数建立的受压损伤本构模型可较好地表征蒸汽养护混凝土在初始冻融损伤后,其单轴抗压应力与损伤程度之间的关系,实现了对蒸汽养护混凝土损伤定量分析.在受压过程前期,蒸汽养护混凝土损伤发展较为缓慢;当相对峰值应力达到 0.8 以后,蒸汽养护混凝土损伤发展较为迅速,直至受压破坏.

(3)基于声发射累计事件数建立的初始冻融损伤变量 D_{i0} 变化规律表明,60、80℃蒸汽养护温度不利于混凝土抗冻性能发展;40℃蒸汽养护混凝土与标准养护混凝土抗冻性能无明显差异.

参考文献:

- [1] 熊蓉蓉, 龙广成, 谢友均, 等. 矿物掺合料对蒸汽高强浆体抗压强度及孔结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(2):175-181. XIONG Rongrong, LONG Guangcheng, XIE Youjun, et al. The effect of mineral admixtures on the compressive strength and pore structure of steam-cured high-strength slurry[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(2):175-181. (in Chinese)
- [2] 胡少伟, 娄本星, 尹阳阳, 等. 蒸汽混凝土早期断裂性能研究[J]. 水利水运工程学报, 2020(4):88-95. HU Shaowei, LOU Benxing, YIN Yangyang, et al. Research on early fracture performance of steam-cured concrete[J]. Journal of Water Resources and Water Transport Engineering, 2020(4):88-95. (in Chinese)
- [3] 贺炯煌, 马昆林, 龙广成, 等. 蒸汽养护过程中混凝土力学性能的演变[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(11):1584-1592. HE Jionghuang, MA Kunlin, LONG Guangcheng, et al. Evolution of concrete mechanical properties during steam curing[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(11):1584-1592. (in Chinese)
- [4] 谢友均, 王猛, 马昆林, 等. 不同养护温度下蒸汽混凝土的冲击性能[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(3):521-528, 536. XIE Youjun, WANG Meng, MA Kunlin, et al. Impact performance of steam-cured concrete at different curing temperatures[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):521-528, 536. (in Chinese)
- [5] JIANG P, JIANG L H, ZHA J, et al. Influence of temperature history on chloride diffusion in high volume fly ash concrete[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144:677-685.
- [6] 高矗, 申向东, 王萧萧, 等. 应力损伤轻骨料混凝土抗冻融性能[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(10):1247-1252. GAO Chu, SHEN Xiangdong, WANG Xiaoxiao, et al. Freeze-thaw resistance of stress-damaged lightweight aggregate concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(10):1247-1252. (in Chinese)
- [7] MA H Y, YU H F, SUN W. Freezing-thawing durability and its improvement of high strength shrinkage compensation concrete with high volume mineral admixtures [J]. Construction and Building Materials, 2013, 39:124-128.
- [8] GESOGLU M, GUNYIS E, KHOSHNAW G, et al. Abrasion and freezing-thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers [J]. Construction and Building Materials, 2014, 73:19-24.
- [9] 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):17-23, 32. CAO Dafu, FU Lizhi, YANG Zhongwei, et al. Research on constitutive characteristics of concrete under compression under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1):17-23, 32. (in Chinese)
- [10] 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. HONG Jinxiang, MIAO Changwen, LIU Jiaping, et al. Decay law of mechanical properties of concrete damaged by freeze-thaw [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2):173-178. (in Chinese)
- [11] 陈徐东, 黄业博, 陈晨. 橡胶自密实混凝土断裂性能及声发射特征[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):758-765. CHEN Xudong, HUANG Yebo, CHEN Chen. The fracture performance and acoustic emission characteristics of rubber self-compacting concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):758-765. (in Chinese)
- [12] OHTSU M. Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic application[J]. Journal of Acoustic Emission, 1987, 6(2):99-108.
- [13] 纪洪广, 贾立宏, 李造鼎. 混凝土损伤的声发射模式研究[J]. 声学学报, 1996(增刊1):601-608. JI Hongguang, JIA Lihong, LI Zaoding. Research on acoustic emission mode of concrete damage [J]. Acta Acoustics, 1996 (Suppl 1):601-608. (in Chinese)
- [14] 龙广成, 杨振雄, 白朝能, 等. 荷载-冻融耦合作用下充填层自密实混凝土的耐久性及其损伤模型[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(7):855-864. LONG Guangcheng, YANG Zhenxiong, BAI Chaoneng, et al. Durability and damage model of self-compacting concrete filled layer under load-freeze-thaw coupling[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(7):855-864. (in Chinese)
- [15] 余寿文. 损伤力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1997:26-32. YU Shouwen. Damage mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997:26-32. (in Chinese)
-
- [17] XIE N, DANG Y D, SHI X M. New insights into how $MgCl_2$ deteriorates Portland cement concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 120:244-255.
- [18] FAY L, SHI X M. Laboratory investigation of performance and impacts of snow and ice control chemicals for winter road service [J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2011, 25(3):89-114.
- [19] SPRY P G, CODY R D, CODY A M, et al. Observations on brucite formation and the role of brucite in Iowa highway concrete deterioration[J]. Environmental and Engineering Geoscience, 2002, 8(2):137-145.
- [20] LINDMARK S. Mechanisms of salt frost scaling of Portland cement-bound materials: Studies and hypothesis [D]. Lund, Sweden:Lund University, 1998.

(上接第 136 页)