

谢秋桐, 陈徐东, 白银, 等. 循环损伤后全级配混凝土断裂过程声发射特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(2): 359-367.  
XIE Q T, CHEN X D, BAI Y, et al. Acoustic emission characteristics of full-graded concrete fracture process after cyclic damage[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 359-367. (in Chinese)

# 循环损伤后全级配混凝土断裂过程声发射特征

谢秋桐<sup>1</sup>, 陈徐东<sup>1</sup>, 白银<sup>2</sup>, 郭胜山<sup>3</sup>

(1. 河海大学土木与交通学院, 南京 210024; 2. 南京水利科学研究院材料结构研究所, 南京 210029;  
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

**摘要:** 为研究初始循环损伤对全级配混凝土断裂损伤特性的影响, 对承受不同初始循环损伤的全级配混凝土梁进行三点弯断裂试验研究, 并结合声发射(acoustic emission, AE)技术对预损伤后断裂过程进行监测。结果表明: 初始循环荷载增幅越大, 混凝土梁在初始循环阶段累积的损伤越大, 损伤后再加载的峰值荷载越小, 脆性特征更明显; 对比分析多个 AE 损伤指数发现, 在加载中后期, 全级配混凝土的断裂特性受初始循环损伤的影响逐渐变小, 此时试件的受损主要受到内部大骨料分布的影响; 对预损伤后加载过程中 RA-AF 值(RA value-average frequency value)分析可知, 剪切裂纹占比随加载进程的推进递增, 但拉伸裂纹占比始终占主导地位, 且随着初始循环增幅越大, 破坏时剪切裂纹占比越大。研究成果对预测分析混凝土大坝断裂破坏具有较好的实际应用价值。

**关键词:** 全级配混凝土; 三点弯断裂; 循环损伤; 声发射; 损伤特征

**中图分类号:** TV431 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0037

全级配混凝土在大坝等水工构筑物中有着非常广泛的应用。与普通混凝土不同的是, 全级配混凝土含有大骨料, 给试验的进行带来了一定的困难。在以往研究<sup>[1-2]</sup>中, 通常采用筛去其中粒径大于 40 mm 骨料后的湿筛小试件代替大坝混凝土研究其力学性能。大量研究<sup>[3-6]</sup>表明, 由于骨料连锁效应, 用湿筛混凝土的力学性能来代替全级配混凝土具有较大局限性。因此, 对全级配大坝混凝土展开试验研究显得极其重要。

一些学者通过试验研究了大坝混凝土的真实材料属性, 包括单轴拉伸下的应力-应变曲线<sup>[4]</sup>、抗压强度的尺寸效应<sup>[7]</sup>及断裂韧性<sup>[8]</sup>等。现有研究主要集中于单一的静、动荷载工况。Bu 等<sup>[9]</sup>对不同加载速率下的全级配混凝土的断裂特性展开了研究, 发现随着加载速率增加, 混凝土断裂峰值荷载及断裂能均增大, 存在明显率效应。Chen 等<sup>[10]</sup>对承受不同速率的循环荷载的全级配混凝土开展三点弯断裂试验, 发现其刚度衰减亦存在明显率效应。在实际工程中, 混凝土大坝常受到水、温度和地震等循环

荷载影响, 大坝内部不断产生裂缝进而破坏了大坝整体性, 影响了大坝耐久性, 危及了大坝正常运行<sup>[11]</sup>。Li 等<sup>[12]</sup>研究了大坝混凝土峰后循环响应, 发现混凝土在遭到外部荷载作用开裂后仍会具有一定抵抗循环荷载的能力。周继凯等<sup>[13]</sup>通过对三级配大坝混凝土展开动态弯拉试验, 发现大坝混凝土强度受初始静载影响很大, 且在动态加载过程中预损伤与率效应叠加, 影响更为复杂。因此, 考虑复杂加载历史下大坝混凝土断裂特性的变化规律, 有助于大坝工程建设, 提高混凝土大坝安全性。

声发射(acoustic emission, AE)技术能够连续、实时地监测荷载作用下脆性材料内部裂缝的发生和发展, 在工程界和学术界得到广泛青睐<sup>[14]</sup>。胡少伟等<sup>[15]</sup>将声发射技术引入混凝土双 K 断裂参数试验中, 建立了混凝土断裂的 AE 判据, 并通过 AE 参数来判别试件的起裂时刻。Ming 等<sup>[16]</sup>发现 AE 还可以用来监测混凝土内部微裂纹的演化过程并预测其宏观裂缝的位置。

综上所述, 目前对真实级配的全级配混凝土所

收稿日期: 2023-08-02 修回日期: 2023-12-07 网络出版时间: 2024-03-14

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240312.1813.006>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379124; 51979090)

作者简介: 谢秋桐(1997—), 女, 江苏南通人, 主要从事混凝土动力力学特性研究。E-mail: x574509804@163.com

通信作者: 陈徐东(1985—), 男, 江苏如东人, 教授, 博士, 主要从事水工混凝土静动力特性与性能调控研究。E-mail: xdchen@hhu.edu.cn

开展的研究较少,对考虑初始循环损伤的全级配混凝土断裂特性研究更是鲜见报道。基于此,本文对承受不同增幅的初始循环损伤后的全级配混凝土展开三点弯断裂试验,并利用 AE 特征参量分析全级配混凝土试件的断裂行为。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料及试样制备

试验制备全级配混凝土的胶凝材料为马鞍山地区生产的海螺牌 P·O 42.5 水泥,各项指标符合《通用硅酸盐水泥》(GB 175—2020)的规定要求。

粗骨料采用最大粒径为 150 mm 的玄武岩碎石。细骨料选用表观密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup> 的天然河砂。添加部分 II 级粉煤灰作为矿物掺合料。减水剂为高效聚羧酸减水剂。水为实验室自来水。具体配合比见表 1。

试件尺寸为 450 mm×450 mm×1 700 mm,浇筑混凝土梁所用模具为预先制作好的木质模具。通过模具跨中固定的高 180 mm,厚 2 mm 的钢片分隔来产生预制裂缝,裂缝高度与试件高度之比为 0.4。浇筑后 3 d 进行脱模,养护期为 28 d。

表 1 全级配混凝土配合比

Tab. 1 Mix ratios of fully-graded concrete

单位: kg/m<sup>3</sup>

材料	水泥	粉煤灰	水	砂	小石(5~20 mm)	中石(20~40 mm)	大石(40~80 mm)	特大石(80~150 mm)	减水剂
用量	180	60	84	652	326	378	460	134	1.211

### 1.2 试验方法

参照《水工混凝土断裂试验规程》(DL/T 5332—2005),采用 MTS322 电液伺服试验机开展三点弯断裂试验,实际加载跨径为 1 350 mm。试验中全级配混凝土梁共有 3 种荷载工况,编号分别为 IFGC-1、IFGC-2 和 IFGC-3。先以 1 kN/s 的速率加载至 30 kN,然后施加频率为 0.5 Hz 的 5 级常应力幅循环荷载,每一级循环加载 10 次。5 级循环加卸载结束后,再卸载至荷载为零。为了比较不同循环荷载增幅对全级配混凝土梁的损伤差异,选择了 3 种不同增幅的循环荷载,IFGC-1~IFGC-3 的每级增幅分别为 2.5、5.0 和 7.5 kN。对承受初始损伤后的全级配混凝土,以 0.001 mm/s 的速率单调加载至试件破坏。通过安装在预制裂缝两侧的夹式引伸计测量和控制预制裂缝口张开位移(crack mouth opening displacement, CMOD)。典型荷载( $P$ )-时间( $t$ )曲线见图 1。

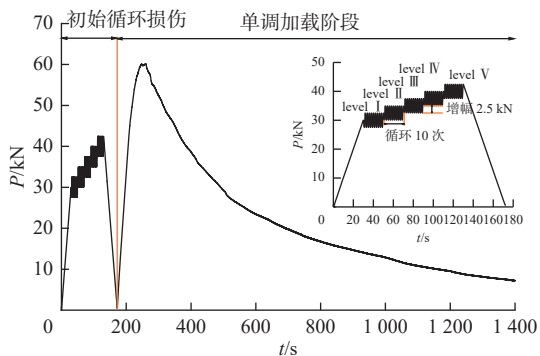


图 1 典型荷载-时间曲线

Fig. 1 Typical load-time curve

声发射仪器为美国 PAC 公司的十六通道 SAMOS<sup>TM</sup> 声发射检测系统。在混凝土梁的前后两侧及顶部各有 2 个 AE 传感器用于采集数据。为降低噪声干扰,设定信号采集阈值为 40 dB。AE 传感器布置见图 2。

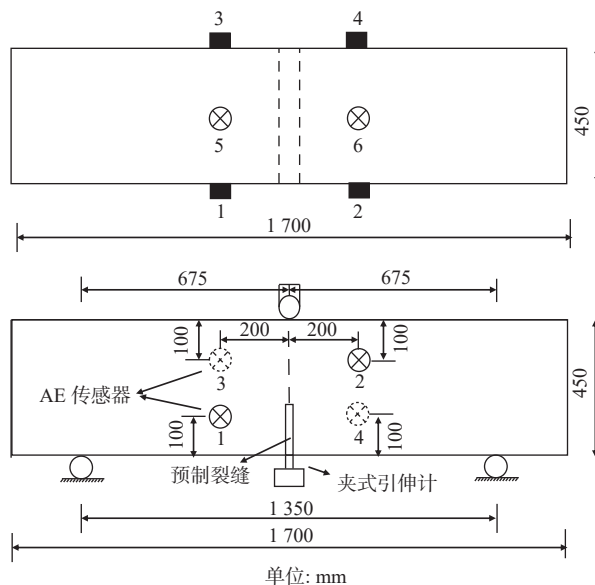


图 2 AE 传感器布置

Fig. 2 AE sensor layout

### 1.3 割线模量损伤指数

在混凝土的应力-应变曲线中,常用弹性模量的衰减来描述混凝土的损伤程度。类似地,在三点弯试验中,可以用  $P$ -CMOD 曲线中的割线模量来表征混凝土的损伤<sup>[17]</sup>。混凝土梁的初始弹性模量为  $E_0$ ,将循环荷载阶段的滞回环卸载点和重加载点连线

的斜率定义为割线模量,命名为  $E_n$ 。以割线模量定义的损伤指数公式<sup>[18]</sup>为

$$D_E = 1 - \frac{E_n}{E_0} \quad (1)$$

式中:  $D_E$  为损伤指数;  $E_0$  为初始弹性刚度;  $E_n$  为第  $n$  次循环荷载的滞回环的割线模量。

## 2 P-CMOD 曲线及割线模量损伤指数分析

### 2.1 循环加载阶段

初始循环损伤阶段  $P$ -CMOD 曲线见图 3。根据公式 (1) 计算得出的割线模量损伤指数  $D_E$  随循环次数  $n$  的变化曲线见图 4。

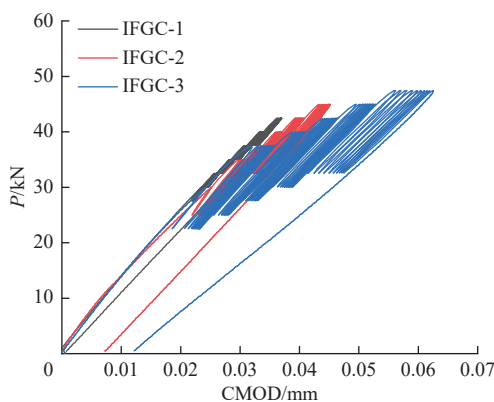


图 3 初始循环损伤阶段  $P$ -CMOD 曲线  
Fig. 3  $P$ -CMOD curves during initial cyclic damage phase

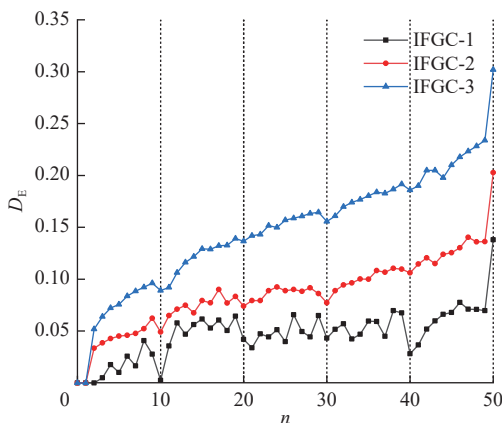


图 4 割线模量损伤指数随循环次数的变化曲线  
Fig. 4 The damage value curves defined by secant modulus

从图 3 可以看出,随循环次数的增大每一次循环最大荷载处的裂缝口张开位移( $CMOD_{max}$ )逐渐增大。在每级循环中,滞回环都先稀疏后变密集,且随着应力级数的增加,滞回环逐渐变得稀疏。这表明随着应力级数的提高试件的  $CMOD_{max}$  增量增加。由图 4 可知,在每一级荷载水平中,前两次循环损伤累积比较明显,在后续持续循环荷载作用下,材料

损伤累积缓慢,几乎呈稳定状态。这主要是因为荷载上限的提高导致混凝土内部产生了新的裂缝,从而产生了较大损伤。循环加载阶段结束时,试件 IFGC-1 的割线模量损伤指数为 0.138,当每级循环增幅增大至 5.0 和 7.5 kN 时,割线模量损伤指数分别增大 47.1% 和 119.0%。总体上,割线模量损伤指数的增长速率随循环荷载增幅的提高而显著增大。

### 2.2 单调加载阶段

三组试件预损伤后单调加载阶段  $P$ -CMOD 曲线见图 5。

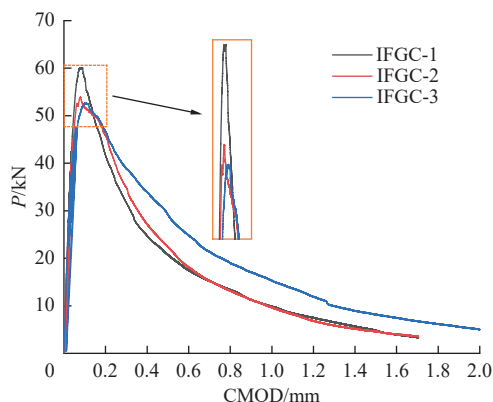


图 5 单调加载阶段  $P$ -CMOD 曲线  
Fig. 5  $P$ -CMOD curves of monotone loading phase

从图 5 可知,初始循环荷载增幅的提升会使损伤后梁的承载能力相应地降低。当每级循环增幅为 2.5 kN 时,峰值荷载为 60.11 kN,而当循环增幅提升至 5.0 和 7.5 kN 时,最大荷载承受能力分别为 53.88 和 52.63 kN,分别降低了 10.36% 和 12.44%。从图 5 还可以看出,随着循环荷载增幅的提升,峰前阶段的曲线的非线性特征越明显。这是由于初始循环荷载增幅越大,循环损伤累计越大,接近峰值荷载时,裂缝尖端存在更多的微裂纹,随着微裂纹的不断聚合发展,裂缝更早地进入非线性发展阶段。

## 3 AE 特性分析

### 3.1 AE 振铃计数和撞击数

混凝土梁损伤从承受初始荷载开始逐渐累积,通过分析 AE 参数的变化规律,对全级配混凝土的损伤断裂机制展开研究。3 组试件荷载-振铃计数-撞击计数随时间的变化关系见图 6。

从图 6 可以看出,声发射累计振铃计数与累计撞击数曲线可分为 3 个阶段,2 个拐点分别为荷载峰值点和峰后软化点<sup>[19]</sup>。当荷载未达到峰值荷载时,此时捕捉到的声发射信号较少,累计振铃计数和撞

击数缓慢增加,试件内部应变较小,仅产生一些分散的微裂缝。当荷载超过峰值点( $P_h$ )后,累计振铃计数和累计撞击数快速增加,反映了此阶段试件内部损伤源十分活跃,裂缝的大小和数量迅速增加,试件的承载能力也随之快速减小。当荷载曲线越过软化点( $50\%P_h$ )后,荷载下降速度降低,振铃计数和撞击数累计速度明显减缓,反映了此阶段主要是大裂缝不断扩展贯通,形成宏观裂缝,最终破坏。

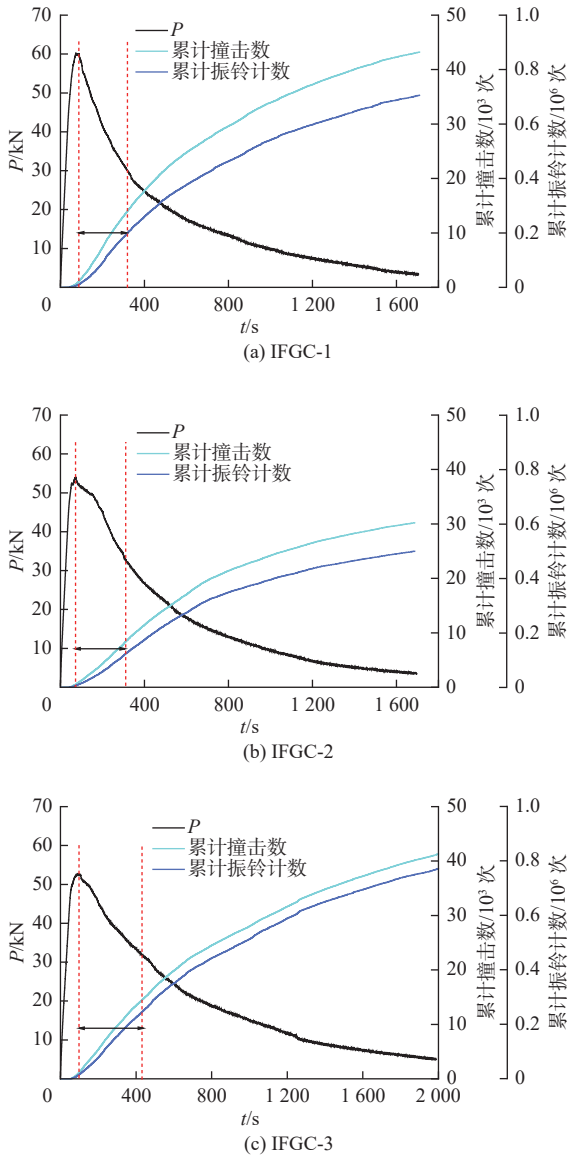


图 6 荷载-振铃计数-撞击计数随时间的变化关系

Fig. 6 Load-ringing count-impact counting relationship with time

### 3.2 $b$ 值

$b$  值分析法最早应用于地震学中,表征地震震级-频度关系<sup>[20]</sup>。在混凝土结构开裂研究中发现,该过程中存在大量与地震活动相似的声发射活动,声发射波与地震波也相似。因此,混凝土破坏过程中的  $b$  值分布可用来分析材料的损伤特性。公式<sup>[21-22]</sup>为

$$\log_{10}N = a - b(A_{dB}/20) \quad (2)$$

式中: $A_{dB}$  为振幅; $N$  为振幅超过  $A_{dB}$  的试件数; $a$  为经验值; $b$  为大、小声发射事件所占的比例。

声发射  $b$  值与材料内部微裂纹的扩展存在密切关系,是材料对所受荷载的响应。大量研究<sup>[23-25]</sup>表明:微裂缝主要产生弱声发射信号, $b$  值升高;而宏观裂缝产生强声发射信号, $b$  值降低。因此,利用  $b$  值能较好地表征加载过程中混凝土内部裂缝的发展过程。荷载- $b$  值随时间  $t$  的变化曲线见图 7。

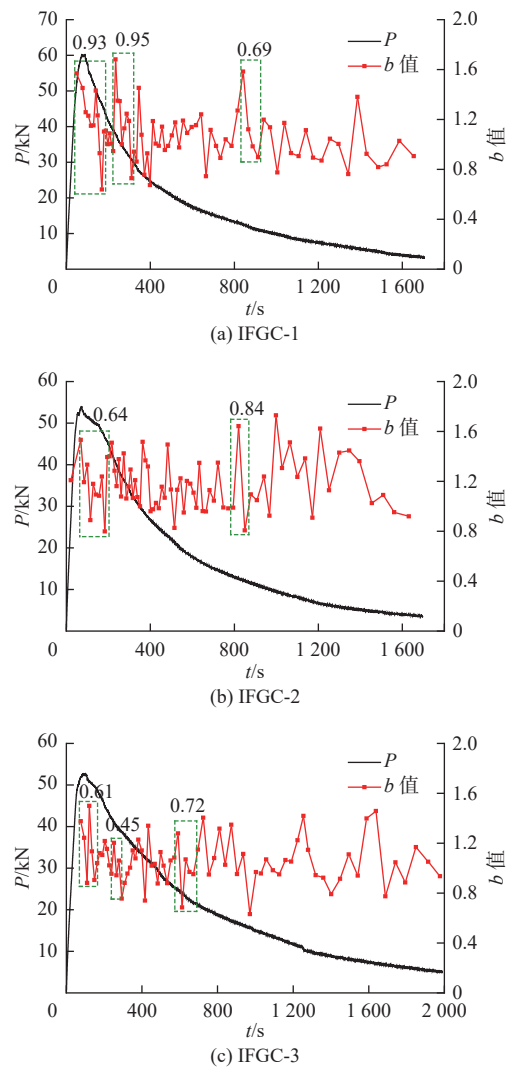


图 7 荷载- $b$  值随时间的变化曲线

Fig. 7 Load- $b$  value curves with time

从图 7(a) 可以看出,达到峰值荷载后荷载产生了小段的快速下降,对应时间段的  $b$  值产生了一个明显下降段,下降量约为 0.93。图 7(b)、7(c) 在相同阶段  $b$  值分别降低了 0.64 和 0.61。这表明该阶段梁内部发生了剧烈的损伤,微裂缝迅速收敛并扩展为大裂缝,释放出较多应变能。在加载后期, $b$  值在 1.0 上下缓慢波动,这说明在裂缝扩展过程中,不断

产生新的微裂缝并扩展成大裂缝。比较不同初始损伤的试件可以发现,在峰后软化阶段,IFGC-1试件  $b$  值的变化幅度最为剧烈,表明试件内部裂缝扩展最为激烈,这是因为初始损伤较低的试件强度更大,抵御外荷载能力较强,在裂缝产生和扩展过程中能够吸收更多的能量<sup>[26]</sup>。

### 3.3 AE 损伤指数

混凝土从损伤为 0 开始到完全失效的过程中,振铃计数、能量和撞击数等 AE 参数不断累积,可以用来定量表征混凝土的损伤程度。以 AE 参数定

义的损伤指数公式<sup>[10]</sup>为

$$D_{AE} = \frac{\sum_0^t i}{\sum_0^T i} \quad (3)$$

式中:  $D_{AE}$  是以 AE 参数定义的损伤指数;  $i$  为 AE 参数,指代振铃计数、能量和撞击数;  $t$  为试验加载的某个时刻;  $T$  为试件最终失效破坏的时刻。

根据式(3)得出的声发射损伤指数  $D_{AE}$  随加载进程的变化规律见图 8。

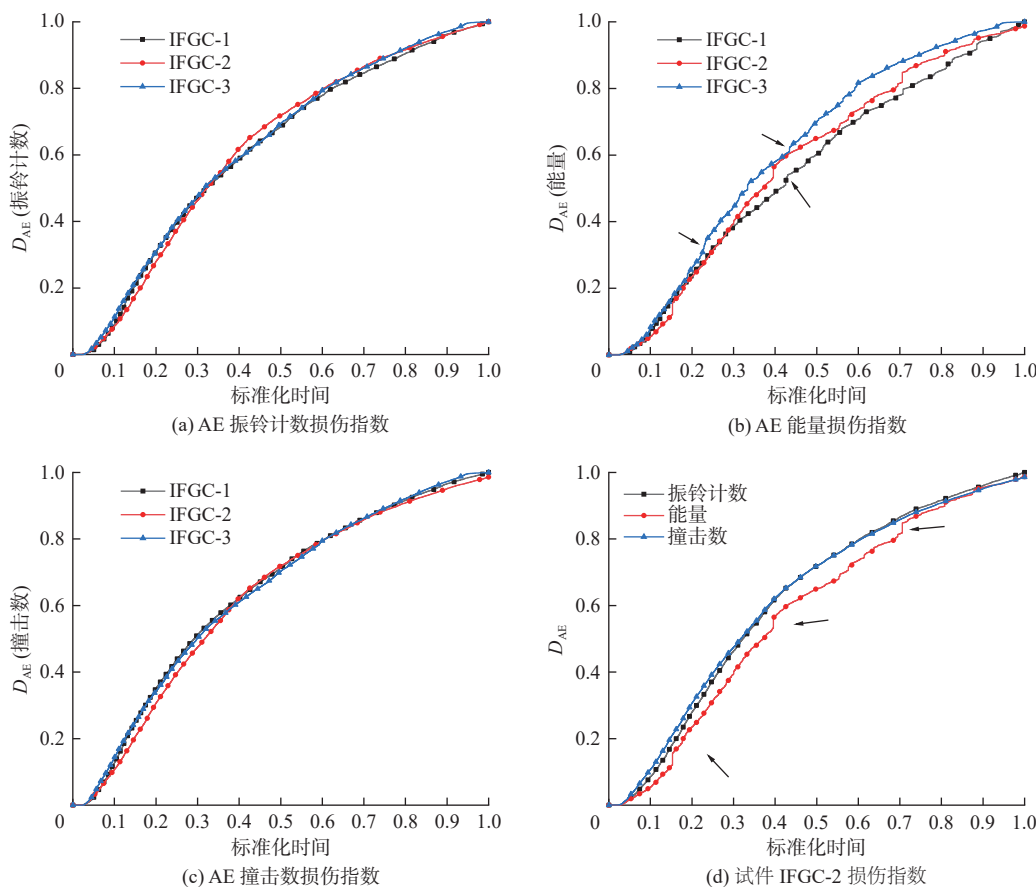


图 8 不同 AE 参数定义的损伤指数  $D_{AE}$  随加载进程的变化

Fig. 8 Damage index  $D_{AE}$  defined by different AE parameters

图 8(a)、8(b)、8(c) 分别为振铃计数、能量和撞击数定义的损伤指数随标准化时间的变化曲线,标准化时间为此时加载时间与破坏时加载时间的比值。从图 8 可以看出 3 组参数的规律大致一致:在峰后软化阶段初期,随着初始循环增幅的增加,全级配混凝土的 AE 损伤指数逐渐增大;但随着加载进程的推进,3 组试件的 AE 损伤指数曲线出现了多个交点,这表明全级配混凝土的断裂特性受初始损伤的影响逐渐变小,此时试件的受损主要受到了

内部大骨料分布的影响。

从图 8(d) 分析这 3 种 AE 损伤指数的差异性。从 AE 损伤指数整体的敏感性上讲,撞击数的损伤指数更敏感。因为在整个加载过程中,撞击数的损伤指数一直是大于另外两个损伤指数的。但是,就局部的损伤而言,能量损伤指数更加敏感。从图 8(b)、8(d) 都可以明显地观察到能量的损伤指数存在多个突变点,这可能是全级配混凝土梁的某个局部缺陷发生了突然损伤,释放出较大的能量被 AE 装置捕捉到了。

### 3.4 AE 分类

有学者<sup>[27]</sup>研究发现,在以张拉破裂为主导的破坏中,临近破坏阶段同样会出现较多的剪切破坏特征。同时,由于全级配混凝土中大骨料的存在和边界效应,在加载过程中也会出现剪切损伤。因此,本文利用 RA-AF 值对全级配混凝土三点弯曲过程中的损伤模式进行分析。AF 值(average frequency value)为振铃计数与持续时间的比值,即平均频率;RA 值(RA value)为上升时间段信号包络线梯度的倒数,是上升时间与幅值的比值。研究发现,水泥基体开裂等拉伸裂缝导致 AF 值较高、RA 值较低,而骨料脱粘等剪切裂缝则导致持续时间较长,AF 值较低、RA 值较高。参考前期研究,将分界指标  $k$  取值为 RA:AF=80:1<sup>[28-29]</sup>。AE 损伤分类见图 9。

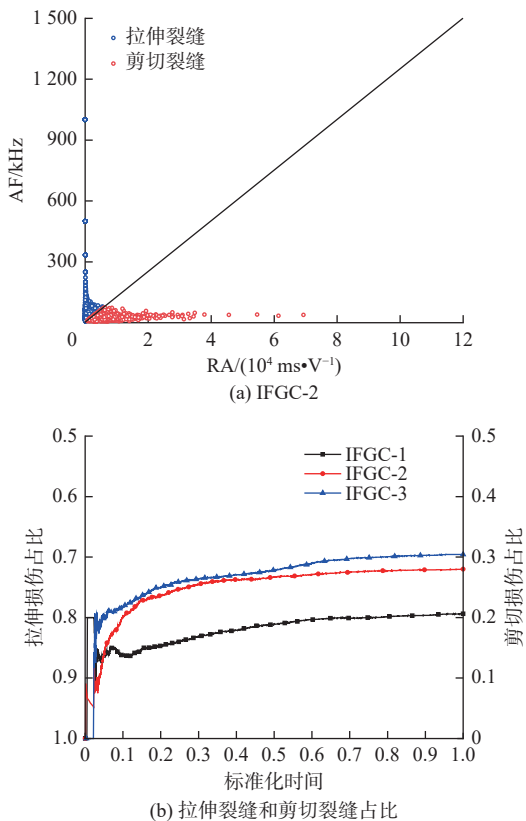


图 9 损伤分类  
Fig. 9 Damage classification

图 9(a) 为以试件 IFGC-2 为例的 RA-AF 分布图。可见,标线上部的声发射信号为拉伸裂缝,下部的声发射信号为剪切裂缝<sup>[30]</sup>。图 9(b) 为拉伸裂缝与剪切裂缝占比曲线图。由图 9(b) 可以看出,随着加载进程的推进,拉伸裂缝与剪切裂缝占比曲线基本稳定,呈缓慢上升趋势。这表明在全级配混凝土宏观裂缝的发展过程中,由于大骨料的存在和边界效应产生了明显剪切裂缝。结合荷载曲线可以发现,此时恰好为荷载曲线的软化点,该阶段荷载下降速

率逐渐降低,裂缝开裂主要是由微裂缝贯通形成宏观裂缝。当峰前循环增幅由 2.5 kN 增加到 5.0 kN 时,剪切裂缝所占比例大幅增加,加载结束时,剪切裂缝占比由 21% 增长到 28%,增长了 33.3%;当循环增幅由 5 kN 增加到 7.5 kN 加载结束时,剪切裂缝占比由 28% 增长至 30%,增长了 7.1%。

综上所述,随着峰前循环荷载增幅的提高,虽然试件的损伤仍以拉伸裂缝为主,但剪切裂缝占比也明显增加。随着初始循环增幅加大,循环阶段试件内部产生了更多的微裂缝,裂缝在后续开展过程中更容易碰到大骨料,产生剪切裂缝<sup>[13,22]</sup>。

### 3.5 AE 信号定位

试验采用 Sensor Highway III 声发射系统内置的三维定位模式,利用时差定位法得到准确的 AE 信号的位置。AE 幅值可以表征局部损伤的剧烈程度,某处损伤越剧烈,其 AE 幅值越高<sup>[31]</sup>。3 组试件断裂加载过程中的 AE 信号的分布情况见图 10。

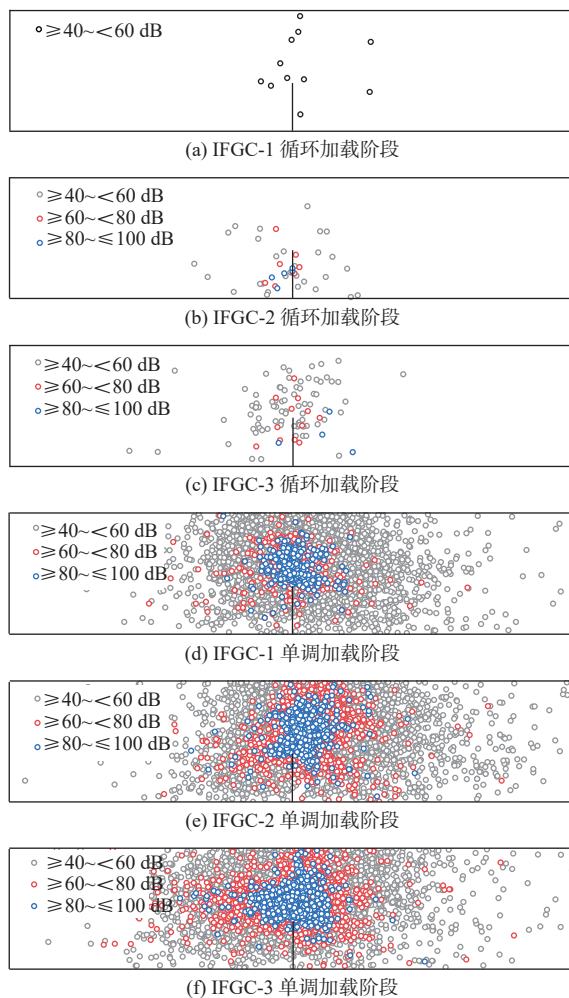


图 10 AE 信号分布  
Fig. 10 AE signal localization

从图 10 可以发现,整个加载过程中 AE 定位信号主要集中分布在跨中预制裂缝发展区域。对比

分析图 10(a)、10(b) 和 10(c) 发现,在初始循环损伤阶段,循环增幅越大,AE 信号数增多且 80~100 dB 高幅值信号也显著增多,循环阶段累计的损伤越大,但总体上与单调加载相比很少。观察 3 组试件单调加载阶段 AE 信号分布情况可以发现,随着初始循环增幅提高,60~100 dB 高幅值 AE 信号数明显增多且密集分布区域的宽度更大。

## 4 结论

采用声发射(AE)技术研究了全级配混凝土梁在三点弯荷载作用下的断裂特性。AE 系统采集了整个加载过程中梁内部的声发射信号,并通过分析,得出以下结论:

随着初始循环增幅提高,大坝混凝土在循环阶段积累损伤越多,损伤后的混凝土试件峰值荷载相应减小,脆性特征更明显。

依据 AE 累计撞击数和累计振铃计数曲线,预损伤后的全级配混凝土断裂过程可以分为 3 个阶段,2 个拐点分别为峰值荷载点和峰后软化阶段拐点。

AE 参数损伤指数可以较好地表征加载过程中全级配混凝土损伤程度。其中,撞击数损伤指数对整体损伤识别更为敏感,而能量损伤指数可以更好地表征局部损伤。随着加载进程的推进,全级配混凝土损伤受初始循环损伤的影响逐渐减小,此时主要受到试件内部大骨料分布的影响。

统计 3 组试件的 RA-AF 值发现,随着加载进程的推进,剪切裂缝所占的比例逐渐增大。因此,剪切裂缝的占比变化可以用来表征全级配混凝土的损伤程度,且随着峰前循环荷载增幅的提高,虽然试件损伤仍以拉伸裂缝为主,但剪切裂缝占比也明显增加。

### 参考文献:

- [1] 古丽娜,田军涛,孔祥芝,等.基于全级配试件性能的大坝混凝土抗裂性分析[J].*水利水电技术*,2019,50(12):178-183. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.12.023.
- [2] GUAN J F. Fracture parameters of site-cast dam and sieved concrete[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2016, 68(1): 43-54. DOI: 10.1680/macr.15.00008.
- [3] LI Q B, DENG Z C, FU H. Effect of aggregate type on mechanical behavior of dam concrete[J]. *Materials Journal*, 2004, 101(6): 483-492. DOI: 10.14359/13487.
- [4] DENG Z C, LI Q B, FU H. Comparison between mechanical properties of dam and sieved concretes[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2008, 20(4): 321-326. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20:4(321).
- [5] 陈璋,陈徐东,冯璐,等.被动围压下钢纤维超高性能混凝土冲击压缩力学特性与损伤特征[J].*水利水电技术(中英文)*,2023,54(3):174-181. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.03.016.
- [6] 刘毅,全永威,张秀崧,等.混凝土温度应力仿真模拟与仿真试验同步测试系统[J].*水利水电技术(中英文)*,2022,53(1):63-72. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.01.007.
- [7] KHALOO A R, SHOOREH M R M, ASKARI S M. Size influence of specimens and maximum aggregate on dam concrete: Compressive strength[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 21(8): 349-355. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:8(349).
- [8] SAOUMA V E, BROZ J J, BRÜHWILER E, et al. Effect of aggregate and specimen size on fracture properties of dam concrete[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 1991, 3(3): 204-218. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(1991)3:3(204).
- [9] BU J W, WU X Y, XU H Y, et al. The rate effect on fracture mechanics of dam concrete based on DIC and AE techniques[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2022, 57(6): 496-510. DOI: 10.1177/030932472111038131.
- [10] CHEN X D, GUO Y Z, LI S T. Experimental study on fracture behavior of dam concrete under cyclic loading[J]. *ACI Structural Journal*, 2021, 118(2): 193-202. DOI: 10.14359/51729346.
- [11] 俞海英,武亮,糜凯华.全级配混凝土单轴疲劳特性细观数值模拟[J].*水利水电技术*,2017,48(3):153-157. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2017.03.027.
- [12] LI S T, CHEN X D, ZHANG J H. Acoustic emission characteristics in deterioration behavior of dam concrete under post-peak cyclic test[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123324. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123324.
- [13] 周继凯,吴胜兴,沈德建,等.小湾拱坝三级配混凝土动态弯拉力学特性试验研究[J].*水利学报*,2009,40(9):1108-1115. DOI: 10.7666/d.y1268005.
- [14] TRA V, KIM J Y, JEONG I, et al. An acoustic emission technique for crack modes classification in concrete structures[J]. *Sustainability*, 2020, 12(17): 6724-6724. DOI: 10.3390/su12176724.
- [15] 胡少伟,陆俊,范向前.混凝土断裂试验中的声发射特性研究[J].*水力发电学报*,2011,30(6):16-19,29.
- [16] MING P, LU J, CAI X, et al. Analysis of the crack evolution process in crumb rubber concrete based on

- acoustic emission technology[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(7): 2088-2098. DOI: 10.1007/s12205-020-1508-x
- [17] 唐建辉, 陈徐东, 白银. 峰前和峰后循环荷载下岩石断裂损伤特征[J]. *上海交通大学学报*, 2022, 56(12): 1700-1709. DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.119.
- [18] BEHNIA A, CHAI H K, YORIKAWA M, et al. Integrated non-destructive assessment of concrete structures under flexure by acoustic emission and travel time tomography[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 67: 202-215. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.011.
- [19] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2021.04.012.
- [20] 张朝鹏, 张茹, 张泽天, 等. 单轴受压煤岩声发射特征的层理效应试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 770-778. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2015.04.014.
- [21] COLOMBO S, MAIN I G, FORDE M C. Assessing damage of reinforced concrete beam using “*b*-value” analysis of acoustic emission signals[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2003, 15(3): 280-286. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:3(280).
- [22] RAO M V M S, LAKSHMI K J P. Analysis of *b*-value and improved *b*-value of acoustic emissions accompanying rock fracture[J]. *Current Science*, 2005, 89(9): 1577-1582. DOI: 10.1126/science.1117619.
- [23] GUO Y Z, CHEN X D, YANG H Q, et al. Experimental study on direct tension behavior of concrete through combined digital image correlation and acoustic emission techniques[J]. *Structural Concrete*, 2019, 20(6): 2042-2055. DOI: 10.1002/suco.201800354.
- [24] 郭玉柱, 陈徐东, 胡良鹏, 等. 花岗岩-喷射混凝土梁损伤的声发射可视化表征[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(8): 90-99. DOI: 10.11918/202106018.
- [25] 唐建辉, 陈徐东, 白银, 等. 干湿界面状态下混凝土-环氧胶泥复合体黏结损伤演化过程[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(11): 2877-2885. DOI: 10.14062/j.issn.0454-5648.20220365.
- [26] 陈徐东, 杨瀚清, 石丹丹, 等. 混凝土轴拉断裂声发射特性及尺寸效应研究[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(11): 229-238. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.11.022.
- [27] AGGELIS D G. Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters[J]. *Mechanics Research Communications*, 2011, 38(3): 153-157. DOI: 10.1016/j.mechrescom.2011.03.007.
- [28] ALDAHDOOH M A A, BUNNORI N M. Crack classification in reinforced concrete beams with varying thicknesses by mean of acoustic emission signal features[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 45: 282-288. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.090.
- [29] 吴瑾, 陈徐东, 唐煜, 等. 基于声发射的钢-连续纤维复合筋混凝土柱受压特性分析[J]. *无损检测*, 2021, 43(11): 18-22, 52. DOI: 10.11973/wsjs202111004.
- [30] 冯璐, 陈徐东, 张锦华, 等. 基于声发射技术的非标准自密实混凝土三点弯曲梁动态断裂特性[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(2): 630-640. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20200608.001.
- [31] 吴新宇. 基于DIC和声发射技术的水工混凝土断裂性能研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2022. DOI: 10.27441/d.cnki.gyzdu.2022.001794.

## Acoustic emission characteristics of full-graded concrete fracture process after cyclic damage

XIE Qitong<sup>1</sup>, CHEN Xudong<sup>1</sup>, BAI Yin<sup>2</sup>, GUO Shengshan<sup>3</sup>

( 1. College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Materials & Structural Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China )

**Abstract:** As the main infrastructure of the water conservancy project, the concrete dam undertakes the functions of power generation, flood control and shipping. However, the fatigue damage inside the concrete, caused from repeated loads such as water, temperature and earthquake, accumulates continuously. The durability of the dam is seriously reduced and the stiffness is rapidly degraded, which endangers the normal operation of the dam. However, previous studies mainly focused on single static and dynamic load conditions. In addition, scholars often used wet screening concrete specimens, which were made of coarse aggregates with a particle size greater than 40 mm slowly after screening, to indirectly obtain the basic properties of dam concrete. Due to the influence of aggregate chain



effect, it was difficult to accurately reflect the mechanical properties of dam concrete. Therefore, it is helpful to the construction of dam engineering and improves the safety of concrete dams, considering the influence of initial cyclic damage on the fracture characteristics of full-graded dams.

In order to study the effects of increased cyclic amplitude (2.5 kN, 5.0 kN, 7.5 kN) on the fracture characteristics of full-graded concrete, three-point bending fracture test was carried out on fully-graded concrete specimens subjected to initial cyclic damage. The fracture damage process was monitored by acoustic emission technology.

The results showed that the greater the increased amplitude of the initial cyclic load, the greater the cumulative damage of concrete beams in the initial cyclic damage stage. Moreover, the peak load after damage decreases correspondingly, and the brittleness characteristic is more obvious. Through the analysis of AE  $b$ -value, it is found that after the peak load,  $b$ -value had a significant decline stage. At this stage, the microcracks in the beam rapidly converged and expanded into macroscopic cracks. Late in the loading phase, the  $b$ -value fluctuated slowly around 1.0. It indicated that new micro-cracks were continuously generated inside the specimen and expanded into macroscopic cracks. The formation of macroscopic cracks in the loading process can be well characterized by the change of  $b$ -value. By comparing the AE damage index of energy, ringing count and impact number, it could be found that the damage index curves of the three groups of specimens appeared multiple points of intersection with the advance of the loading process. The damage index of impact number was more sensitive to the overall damage, while the damage index of the energy was more sensitive to the local damage. Through the analysis of RA-AF values, it could be seen that the proportion of shear cracks increases with the loading time, which is mainly due to the presence of large aggregate and boundary effect. But the proportion of tensile cracks always dominates. By comparing the shear crack proportion curves of the three groups of specimens, it could be found that the larger the amplitude with the initial cycle, the larger the proportion of shear cracks during failure.

It can be concluded that the dynamic damage process of full-graded concrete specimens could be well characterized by analyzing acoustic emission parameters such as ringing number, energy and amplitude. It is showed that the greater the increase of initial cyclic load, the more serious the stiffness attenuation of dam concrete and the more obvious brittleness characteristics. Besides, in the middle and late loading period, the fracture characteristics of the sample were mainly affected by the distribution of large aggregates, but not by the initial cyclic damage. In addition, the effect of different initial cyclic damage on the fracture behavior of full-graded concrete was obtained, which could provide practical value for predicting the fracture failure of concrete dam.

**Key words:** full-graded concrete; three-point bending fracture; cyclic damage; acoustic emission; damage characterization