

# 砼受压试验全过程声发射特性研究

陈小佳, 蔡宇清, 崔太雷

(武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 开展砼试块单轴加载试验, 对加载破坏全过程进行声发射检测, 通过对数字信号采集示波器记录的声发射信号的分段离散傅里叶变换, 定性分析了 0~50 kHz 声发射信号随试件加载值的变化规律, 定量分析了声发射全过程 0~12 kHz 各频段能量占比变化规律, 提出了以声发射信号各频段信号能量占比为判断标准的砼损伤识别方法, 并使用  $b$  值法和振铃计数法对该损伤识别方法进行了验证。

**关键词:** 桥梁; 砼结构; 声发射; 受压试验

**中图分类号:** U446.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2018)01-0134-05

砼结构在受载时内部裂纹会逐渐扩展, 从而导致结构失效。砼材料内部裂纹扩展过程中以弹性波的形式释放应变能的物理现象, 称为声发射。声发射检测研究对砼结构损伤部位定位和整体健康状况评价具有重要意义。

谢和平院士对砼的声发射特性和损伤机理作了较系统阐述; 尹贤刚对比了受载岩石与砼的声发射特性, 得出岩石与砼在声发射平静期方面有所区别; 纪洪广、郭庆华等分别对不同强度的砼进行了声发射试验研究, 得出声发射信号优势频率随砼强度增强而提高和不同强度砼的声发射信号活跃期分布不同; Sagar R. V.、Schiavi A. 等使用  $b$  值分析法对受载砼的损伤情况进行了描述, Schiavi A. 还针对 0~10 kHz 频率的声发射信号进行了分析; 秦虎等对不同含水率的岩石进行声发射试验, 得出岩石含水率增加使声发射振铃总数减少和振铃分布滞后; 邹三兵等对自然状态和饱水状态砼在不同加载速率下劈拉破坏声发射特性进行研究, 得出两种状态砼在不同加载速率下内部破坏机制不同; 王健对比了几种降噪算法, 改进了空域相关滤波方法, 并提出了  $b$  值损伤监测算法; 赖于树等在研究 0~26 kHz 低频带能量占比的基础上, 结合声发射计数等参数, 设计了一套砼工程声发射报警系统; 安康等研究了砼三点弯曲梁试件不同破坏阶段的声发射特性。目前对于受载砼损伤程度的声发射检测研究主要集中在声发射频带能量、振铃计数、砼强度、含水率和滤波算法方面, 对于砼受压破坏全过程的声发射研究还不多见, 对于声发射频带能量分布的研究也多停留在定性层面, 更细化的定量研究还较欠缺。该文使用压

力试验机对砼试块进行加载试验, 记录砼受压破坏全过程的声发射信号, 分析声发射信号各频段能量占比随砼试块加载值的变化规律, 得到砼损伤程度与声发射信号特征的对应关系, 为砼构件损伤识别和评估提供研究方法。

## 1 试验设计

试验用砼试件采用 425 号水泥制作, 水灰比为 0.6, 试件尺寸为 15 cm × 15 cm × 30 cm, 养护 28 d, 待试块自然干燥后进行试验。使用建议 TYE-2000A 型液晶显示砼压力试验机对砼试块进行加载, 该压力试验机最大输出压力为 2 000 kN, 压力示数精度为 ±0.5%, 手动控制加载速度。声发射信号的接收采用砼检测用探头, 选择试件侧面中心位置较为光滑的一面放置探头, 探头与试件之间用凡士林作为耦合剂, 试验前将探头用一定的压力固定在放置位置, 保证数据接收质量。探头通过信号线与 WaveSurfer 24Xs-A 型数字信号采集示波器的通道 1 连接, 该示波器每条通道可对声波信号进行达 2.5 GS/s 的高分辨率采样, 带宽为 200 MHz, 可实现对声发射信号的高速实时传输和存储, 也支持对信号进行多种方式的初步处理。试验仪器、试件及探头布置方式见图 1。

为了得到砼试块受载破坏全过程的声发射信号数据, 试验中对砼试块采用匀速增加荷载的加载方式, 荷载增加速度为 1.7 kN/s。前人对砼声发射频谱的研究显示, 50 kHz 以内的频率范围具有研究价值, 根据 Nyquist 采样准则, 采样率设为 100 kS/s, 总加载时间为 350 s, 总采样长度为  $3.5 \times 10^7$  个数据

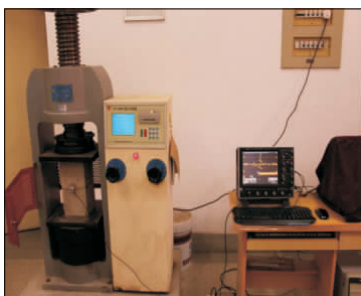


图 1 砧声发射试验装置布置实景

点。砧试块在加载至 601 kN 时发生完全劈裂破坏,砧压力试验机液晶显示屏显示的荷载随时间的变化趋势见图 2,砧试块破坏情况见图 3。



图 2 加载压力随加载时间的变化



图 3 砧试件受压破坏

## 2 声发射信号的采集与处理

### 2.1 声发射信号的采集

在加载过程中通过信号采集示波器连续记录声发射探头接收声波信号,使用 MATLAB 绘制完整时域信号波形(见图 4)。

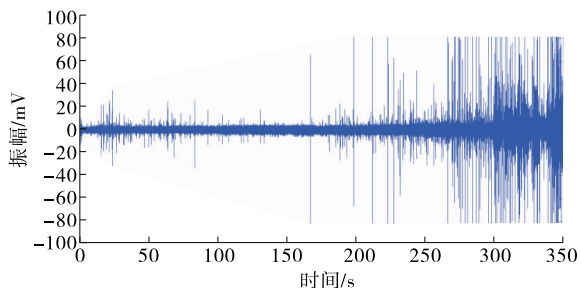


图 4 砧试块受载破坏全过程声发射时域信号

声发射信号在砧的不同破坏阶段具有不同的特征,是一种非平稳时变信号。由图 4 初步定性分析得:加载时间为 0~100 s 时,时域信号中出现一些幅值较小的声发射波形;随着荷载的增加,在 150 s 附近时域信号出现一段“静默期”,然后出现幅值较大的声发射波形;加载 250 s 后,在试件接近承载极限值时出现密集的幅值很高的声发射波形,这与砧受压损伤过程密切相关。

砧是一种准脆性材料,具有较高的强度,但韧性较差,其开裂过程可分为两个阶段,即微观裂缝产生和微观裂缝融合后产生宏观裂缝。微观裂纹产生释放的能量少于宏观裂纹产生时的能量,当出现能量极高的声发射信号时,标志着宏观裂缝的产生。因此,可初步认为刚开始加载时砧受载较小,发生砧的初始压密和弹性变形,是砧内原有空隙的压密而后开始产生微观裂纹的过程;时域信号的“静默期”则表示砧从弹性变形阶段到塑性变形阶段的变化,是微裂缝从增加到互相融合的过程;最后砧发生较大变形并破坏,是微裂缝大量融合形成贯穿裂缝到试件完全失去承载力的过程。

### 2.2 声发射信号的处理

离散的傅里叶变换是声波数字信号处理应用最为广泛的方法,可对声波时域信号进行频率分解,得到对应的频谱图。鉴于声发射信号是时变信号,其总能量并不是恒定的,想要以能量占比来研究声发射信号特征,需先求解声发射信号总能量随加载时间的变化关系。

试验过程存储的超声时域信号数据点较多,且研究内容为砧破坏过程中的频谱变化规律,所以首先对所得数据进行分段,以每 0.5 s 数据为一段单独进行傅里叶变换,统计每次傅里叶变换后的该段数据对应频谱的平均面积,即该段数据的平均能量。声发射信号能量随时间的变化见图 5。

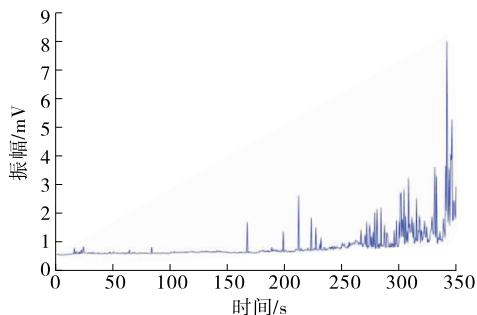


图 5 砧试件受压破坏全过程声信号能量的变化

每次声发射信号傅里叶变换后的频谱均由一系列幅值组成,每个幅值对应一个频率值。设 $t$ 时刻的频谱为:

$$F(t) = [A_{f(1)}, A_{f(2)}, A_{f(3)}, \dots, A_{f(n-1)}, A_{f(n)}] \quad (1)$$

当出现声发射事件时,频谱的分布会发生较大变化,其变化幅度可用两个数列的相似度来衡量,选用加载刚开始时的频谱 $F(0)$ 作为标准值来衡量声发射对频谱带来的变化,表达式见式(2)。频谱相似度随加载时间的变化见图6。

$$I(t) = \frac{[F(0) \cdot F(t)]^2}{F(0)^2 F(t)^2} \quad (2)$$

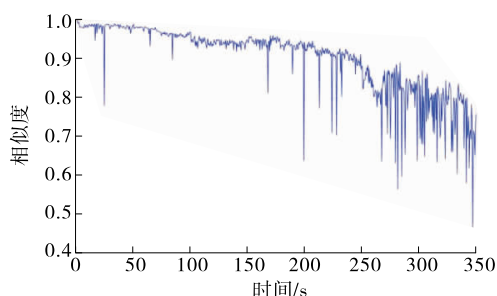


图6 频谱相似度的变化

从图6可看出:随着荷载的增加,声发射信号的频谱发生越来越大的变化,频谱相似度小于0.6标志着砼试块的破坏。

为了更详细地分析频谱的分布情况,将每次傅里叶变换的频谱与对应时间段的0~50 kHz频段总能量相除,得到每个时间段内频率能量占比谱,称作归一化频谱。将这些归一化频谱按照时间先后依次排列,绘制砼受压破坏过程中归一化频谱随加载时间变化的三维图(见图7)。

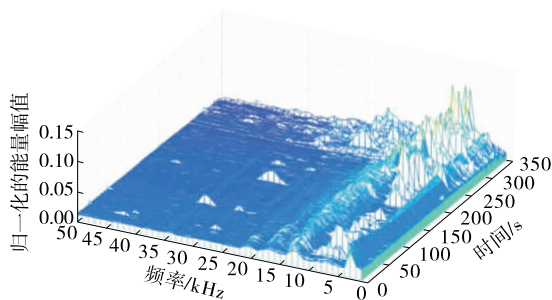


图7 砼受压破坏全过程归一化频谱图

从图7可看出:随着荷载的增加,频谱的能量分布发生明显变化。从加载时间角度分析,加载初期,低频率段(0~12 kHz)为声波能量的主要分布区域;随着加载时间的推移,高能量频率段分布逐渐向

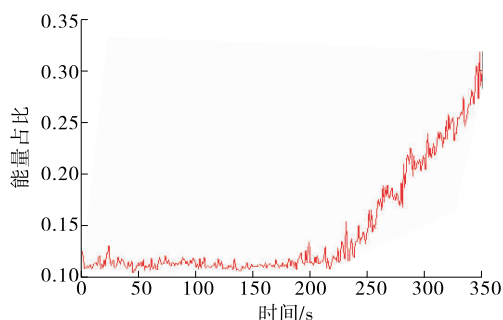
高频率方向移动;砼试块破坏前一段时间,15 kHz以上频段能量占比开始明显增加。从频率分布角度分析,0~5和12~15 kHz频段内能量占比自始至终都较高,呈现连续性,认为这两个频段的声波为环境噪声,在砼损伤识别过程中不考虑其影响;15 kHz以上声发射信号频率在砼接近破坏时才出现,对砼的早期损伤评价没有明显影响,也不考虑其影响;5~12 kHz频段的能量占比与时域信号声发射波形具有较好的一致性,在声发射数据分析时重点进行研究。

### 3 砼损伤程度识别

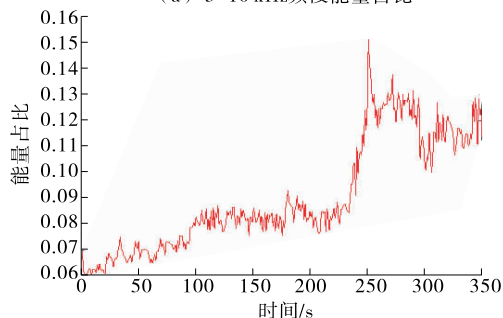
#### 3.1 频谱分析

声发射信号是由岩石及砼等内部产生微裂缝引起的,根据其发生机理,推断相同大小微裂缝引起的声发射信号频率与岩石或砼的材料特性有关。相关研究也表明:准脆性材料的声发射信号频率呈现荷载无关性,其能量分布与材料的强度有关,也与材料所处的损伤阶段有关,材料强度越高,主频越宽,越大的裂缝产生越低频率的声发射信号。

选择频谱中0~12 kHz内每个频率值随加载时间的能量占比进行对比研究,能量占比随加载时间的变化见图8。



(a) 5~10 kHz频段能量占比



(b) 10~12 kHz频段能量占比

图8 砼试件受压破坏全过程各频段能量占比

从图8可看出:总体来说,低频能量占比均随荷载的增加而增加,但不同频率分量的能量占比的增

加趋势略有不同。

根据标准砼试块的应力应变曲线,应力小于40%极限应力时发生弹性变形,应力小于75%极限应力时发生弹塑性变形,应力大于75%极限荷载时开始产生破坏。对于长方体试块,上述数值起到参考作用。结合声发射信号不同频段能量占比的变化,将砼损伤分为轻度损伤、中度损伤、严重损伤3个阶段进行评估。

(1) 轻度损伤阶段。从开始加载直至加载100 s,5~10 kHz频段能量占比没有明显变化,在12%上下波动。10~12 kHz频段能量占比在开始的前20 s没有明显变化,20 s后开始波动上升。当10~12 kHz频段能量占比达到8%并停止增加时,标志着砼试块损伤程度已超过轻度损伤。长方形砼试块的轻度损伤发生在加载100 s内,对应的应力为30%极限应力。加载后试块内部开始发生原有微孔隙压密现象,这种内部结构的细微变化产生频率较低的声发射信号。加载20 s后,除初始孔隙的压密作用外,砼开始发生弹性变形,在压力作用下产生一些细微裂缝,这种裂缝出现时也会产生一些频率较低的声发射信号,这些低频信号能量占比的增加标志着砼内部结构较为细微的变化。

(2) 中度损伤阶段。加载100~230 s时,5~10 kHz频段的能量占比均没有明显变化。加载180 s时,声发射“沉默期”结束,时域信号中产生第一个幅值较大的声发射信号。10~12 kHz频段的能量占比产生一定波动,说明较大的裂缝出现时产生10~12 kHz频率的声发射信号。当5~10 kHz频段能量占比开始明显增加时,标志着中度损伤阶段的结束和严重损伤阶段的开始。期间砼试块承受的压力从30%极限应力增加到70%极限应力,前一半时间试件发生弹性变形,产生更多的微裂纹,在压力作用下,这些微裂纹的产生并没有引起声发射信号,微裂隙增加到一定程度后开始产生较大的裂纹,试件发生塑性变形,并产生强度较大的声发射信号。

(3) 严重损伤阶段。加载230 s后,开始密集出现强度大的声发射信号,频谱的归一化相似度突然降至0.6,5~10 kHz频段的能量占比逐渐从12%增加至30%,10~12 kHz频段的能量占比快速从8%增加至13%,这些变化都标志着砼发生了较大的塑性变形。压力的增加为产生比中等损伤阶段所产生裂缝更大的裂纹创造了条件,这些大裂缝形成后便逐渐连通形成贯通裂缝。由各频段能量占比的

变化规律推断,大裂缝形成时产生10~12 kHz频率的声发射信号,而贯通裂缝形成时产生5~10 kHz频率的声发射信号。

以上对砼的频谱定量分析结果只针对文中试验所用试块和砼种类。根据前人研究成果,不同种类砼的声发射特性有所区别,但对声发射信号的低频部分分布规律进行详细分析的方法可用于其他种类砼的分析。

另外,采用425号水泥、水灰比为0.4制作砼试件进行单轴加载试验,并对加载破坏全过程进行声发射检测,分析得出了类似的结果。该砼试件受压破坏全过程各频段能量占比见图9。

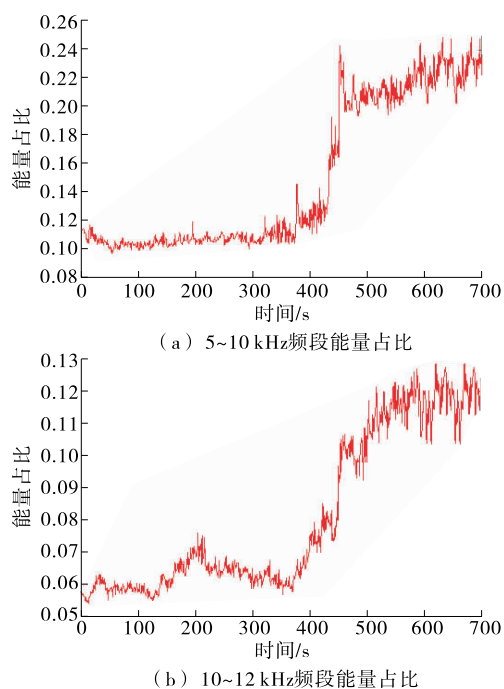


图9 另一砼试件受压破坏全过程各频段能量占比

### 3.2 幅值特征分析

1941年提出的地震震级与频度关系的GR公式现在也经常用于砼的声发射试验数据分析,用以表征材料内部损伤程度,其表达式为:

$$\lg N = a - bM \quad (3)$$

式中: $N$ 为给定时间内幅值大于 $M$ 的声发射事件个数; $a$ 、 $b$ 为经验常数。

在声发射领域,经常使用 $b$ 值( $b$ -value)代表材料损伤程度,其表达式为:

$$b = \frac{a - \lg N}{\lg M} \quad (4)$$

由 $N$ 的定义可先对砼受压破坏全过程声发射信号进行声发射振铃(AE count)计数,以10 s为计



数时间间隔(计算每10 s内声发射次数),当声信号幅值超过5 mV时便认为砼构件内部发生了一次声发射事件。考虑到每次声发射事件都有一段持续的波动,设置1 ms(100个数据点)的声发射计数闭锁时间。两砼试块 $b$ 值曲线和声发射事件数值对照见图10、图11。

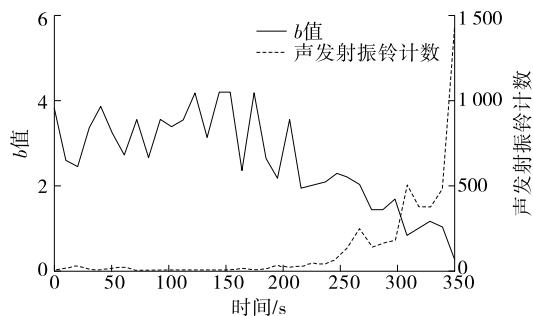


图10 砼声发射计数与 $b$ 值变化对比

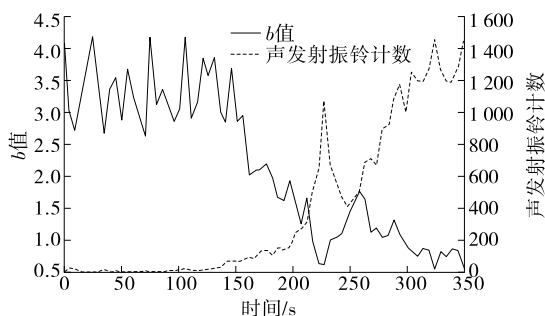


图11 另一砼试件声发射计数与 $b$ 值变化对比

从图10、图11可看出:声发射振铃计数在砼发生严重损伤之前其值较小,当加载时间超过230 s(砼产生严重损伤)后,其值逐渐增加; $b$ 值随着荷载的增加不断波动,对应声发射振铃计数开始增加的时段, $b$ 值急剧减小,当砼试块破坏时 $b$ 值约等于1,试块破坏后 $b$ 值小于1,与前人的研究结论相符。

#### 4 结论

该文对砼试块开展单轴加载破坏全过程声发射试验,通过声发射信号的频谱相似度变化图和归一化频谱图对砼损伤程度与声发射信号频率之间的关系进行了定性分析。同时对低频率信号的能量占比进行了定量分析,当5~10 kHz频段能量占比逐渐增加时,砼试件处于轻度损伤状态;5~10和10~12 kHz频段能量占比较稳定时,砼处于中度损伤状态;5~10 kHz声发射信号能量占比重新开始增加时,砼试件处于严重损伤状态。

#### 参考文献:

- [1] 纪洪广,裴广文,单晓云.混凝土材料声发射技术研究综述[J].应用声学,2002,21(4).
- [2] 陈兵,姚武,吴科如.声发射技术在混凝土研究中的应用[J].无损检测,2000,22(9).
- [3] 谢和平.岩石、混凝土损伤力学[M].北京:中国矿业大学出版社,1990.
- [4] 尹贤刚.受载岩石与混凝土声发射特性对比实验研究[J].四川大学学报:工程科学版,2010,42(2).
- [5] 纪洪广,侯昭飞,张磊,等.混凝土材料声发射信号的频率特征及其与强度参量的相关性试验研究[J].应用声学,2011,30(2).
- [6] 郭庆华,邵保平,李志伟,等.混凝土声发射信号频率特征与强度参数的相关性试验研究[J].中南大学学报:自然科学版,2015,46(4).
- [7] Sagar R V, Prasad B K R, Kumar S S. An experimental study on cracking evolution in concrete and cement mortar by the b-value analysis of acoustic emission technique[J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(8).
- [8] Schiavi A, Niccolini G, Tarizzo P, et al. Acoustic emissions at high and low frequencies during compression tests in brittle materials[J]. Strain, 2011, 47.
- [9] 秦虎,黄滚,王维忠.不同含水率煤岩受压变形破坏全过程声发射特征试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2012, 31(6).
- [10] 邹三兵,杨乃鑫,罗曦,等.基于声发射的自然与饱水状态混凝土动态劈拉特性对比[J].长江科学院院报, 2016, 33(3).
- [11] 王健.基于声发射信号降噪的损伤监测算法研究[D].济南:山东大学,2014.
- [12] 赖于树,熊燕,程龙飞.受载混凝土破坏全过程声发射信号频带能量特征[J].振动与冲击, 2014, 33(10).
- [13] 安康,胡少伟,陆俊,等.声发射参量在混凝土断裂过程中的分布特性分析[J].混凝土, 2016(2).
- [14] Oppenheim A V, Schaffer R W. Discrete-time signal processing[M]. Prentice-Hall Inc, 2005.
- [15] 李俊平,周创兵.岩体的声发射特征试验研究[J].岩土力学, 2004, 25(3).
- [16] 宁喜亮,丁一宁.碳纤维对混凝土单轴受压损伤本构模型的影响[J].建筑材料学报, 2015, 18(2).
- [17] 吕强,胡建中.高性能路面水泥砼热学性能与孔结构特征分析[J].公路与汽运, 2016(5).