doi:10.16018/j.cnki.cn32-1650/n.202003009

# 基于 AE 对预应力钢筋砼梁损伤试验分析

吴 超1,胡强圣1,杨 帆2,郁董凯2

1. 安庆职业技术学院 建筑工程系,安徽 安庆 246001;\

(2. 江苏大学 土木工程与力学学院, 江苏 镇江 212013 /

摘要:为了探究预应力钢筋混凝土梁损伤与其声发射信号之间的关系,利用声发射技术对预应 力钢筋混凝土梁损伤过程进行监测。通过三点弯曲试验,采集到预应力钢筋混凝土梁损伤的实 时声发射信号数据。分析不同荷载下声发射信号幅值与上升时间的参数分布图,并对比加载过 程试件梁的裂缝变化,发现不同信号幅值分布与混凝土梁的损伤类型具有很好的相关性,可以 演化试件梁的损伤过程,其中高幅值信号的集聚意味着宏观裂缝的出现。此外,通过 ISA 信号 强度准则的计算,对预应力钢筋砼梁损伤程度做出了定性评价。

关键词:声发射:预应力:损伤评价:健康监测

中图分类号:TU528.7 文献标志码:A

随着经济的发展,桥梁建设日益增多,桥梁事 故也时有发生,因此对桥梁状况的健康监测和经 常性的质量评估显得尤为重要。

桥梁检测技术有多种,目前比较常用的是声 发射检测技术(Acoustic Emission, AE)。声发射检 测技术是一种动态的无损检测,只需将声发射探 头附着在检测对象表面的适当位置,就可以实现 在线监测整个检测对象。当检测对象受到荷载作 用时,它能及时检测到材料内部发生的变化<sup>[1-2]</sup>, 具有其他无损检测技术无可比拟的优势<sup>[3]</sup>。

目前,国内外学者对声发射检测技术进行了 大量的研究,其中李冬生等分析了钢绞线在拉伸 过程中 AE 信号的相关特性,并对四川省峨边大 渡河拱桥的吊杆进行了检测<sup>[4-5]</sup>; Yoon 等利用 AE 传感器和应变片,监测了首尔 Dang-san 铁路 桥在动荷载作用下疲劳裂纹的发展<sup>[6]</sup>。本文通 过对试验梁加载至破坏的声发射试验并采集声发 射信号,利用相关的声发射分析方法对构件的损 伤演化过程进行分析,并定性或定量地评估损伤 程度,以实现钢筋砼构件损伤状态的 AE 信号 识别。

文章编号:1671-5322(2020)03-0046-06

#### 1 实验方案

#### 1.1 试验梁的制作

试验试件在工地加工成型,尺寸为150 mm× 250 mm×1 200 mm,按照适筋梁配筋,其中受力 筋 HRB335, 箍筋 HPB300, 如图 1 所示。在试件 上浇筑 C50 商品混凝土, 在养护至混凝土强度符 合张拉要求后,张拉钢绞线并锚固。





#### 1.2 声发射仪器及参数设置

试验的 AE 仪器为声华科技 SAEU2 S-4 通道 USB系统,频率范围1 kHz~400 kHz,如图2 所 示。其16位 A/D 转换器,可以同时采集波形和

#### 收稿日期:2020-03-14

作者简介:吴超(1989—),男,安徽安庆人,助教,硕士,主要研究方向为工程结构检测。

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2017A786)。

AE 参数。试验中撞击定义时间 *T*<sub>HDT</sub>通常采用峰 值定义时间 *T*<sub>PDT</sub>的 2~3 倍,而撞击闭锁时间 *T*<sub>HLT</sub> 比撞击定义时间 *T*<sub>HDT</sub>要大 20% 左右。

根据测试对象和实验室的现场条件进行现场 调试后,参数设置如表1所示。



图 2 声发射仪器 Fig 2 Acoustic emission instrument

Table 1	Setting	of	AE	detection	parameters
---------	---------	----	----	-----------	------------

参数	参数值
增益/dB	40
门槛/dB	50
滤波/kHz	$1 \sim 400$
$T_{ m PDT}/\mu  m s$	220
$T_{ m HDT}/\mu{ m s}$	650
$T_{ m HLT}/\mu{ m s}$	800

#### 1.3 加载方式

采用油压千斤顶为加载仪器,其额定起重量为50t,试验装置如图3所示。加载前为了减少噪音的影响,在几个接触点均加上隔音材料,同时也排除了加载过程中其他加载噪音对声发射信号的干扰。加载时需预加载2次,第一次是为了减少试验装置之间的间隙,第二次是为了消除钢筋与混凝土之间的原有缺陷。荷载采用分级加载方式,直至试件丧失承载力。各级加载力如表2所示。收集所有加载过程中的AE信号,得到图4所示的各级荷载的AE信号图(由于第一级荷载较小,基本上没有AE现象,故图中没有画出第一级荷载的AE信号)。

#### 2 声发射信号的参数分析

分析图 4 每一级荷载过程中 AE 信号的上升 时间与幅值的相关性,得出如下结论:



图 3 试验装置布置图 Fig 3 Layout drawing of test device

	表 2	各约	级加载	力		
Table 2	Load	ling	force	at	all	levels

加载阶段	荷载/kN
第1级	3.97
第2级	10.98
第3级	17.99
第4级	24.99
第5级	32.00
第6级	39.01
第7级	46.01
第8级	53.02
第9级	62.35
第10级	71.69

(1)试件在初始损伤阶段,即加载至第2、3 级荷载(图4a、图4b)时,数据点非常少,甚至没 有,这是由于预应力的存在,加载初期的荷载由钢 绞线承担了;同时该阶段声发射数据信号的幅值 基本为70 dB以下的低幅值信号,且持续时间在 500 μs以下,数据没有呈现离散性。

(2)试件在梁微裂缝形成阶段,即加载至第 4、5级荷载(图4c、图4d)时,数据出现分散,但是 分散性的程度还较小;随着幅值超过70 dB的AE 信号的增加,集中在80~100 dB范围内的AE 信 号逐渐出现,但是信号还非常少;此时出现了持续 时间在500 μs以上的AE 信号,这是细微损伤的 扩展阶段,也是微裂纹萌生阶段,加载初期的损伤 在更高一级荷载的作用下,较小的损伤在应力集 中的作用下汇聚成裂纹,混凝土之间的骨料出现 开裂;这一阶段结构内部的损伤累积还处于较低 的状态,其对构件承载力影响较小,结构外观 完好。



Fig 4 Relationship between rise time and amplitude with loading period

(3)试件在带裂缝工作阶段,即加载至第6 级荷载(图4e)时,AE 信号幅值点的离散性显著 增加,说明此时是结构损伤累积的一个关键点(出 现第一条宏观裂缝,图5a);持续时间在500 μs 以 上的 AE 信号显著增加,同时在80~100 dB 范围 内的高幅值信号也有了显著增加,前几个阶段集 聚的能量在此阶段得到释放。

试件在第7级荷载(图4f)时,AE 信号幅值 的离散性逐渐呈下降趋势,同时微裂缝汇集成较 为明显的宏观裂缝;试件梁的跨中出现了细小的 裂缝,裂缝贯穿于试件的侧面,并且进一步扩展。 此时钢筋混凝土梁仍处于安全阶段。

(4)试件梁的失效破坏阶段,即第8级荷载
(图5b)至破坏(图4g~图4i)时,AE信号数据点
明显增加,到第10级荷载达到了峰值;幅值在
80~100 dB的信号显著增加,持续时间在1000
μs以上的信号也明显增加,说明此时试件梁开始

进入失稳破坏阶段,试件梁出现较大的贯通截面 裂缝,试件承载力迅速下降。



a 第6 加载阶段



b 第8 加载阶段

图 5 宏观裂缝发展图 Fig 5 Diagram of macroscopic fracture development

### 3 声发射幅值分析

通过试验发现,高幅值 AE 信号的增多可能 是裂缝汇聚发展的征兆,所以应进一步分析 AE 信号幅值的变化规律。下面将信号幅值分为(0, 60]dB、(60,70]dB、(70,80]dB、(80, +∞)dB 4 个区间,得到各幅值区间信号的百分比,如图 6 所示。



由图 6 可知,试件加载至失稳破坏的过程 中,AE 信号幅值基本集中在(0,60]dB 和(60, 70]dB 两个区间,且两个区间的信号数量很接近, 都约在 45% 左右;而(70,80]dB 和(80, +∞)dB 的 AE 信号占信号总量的百分比有较大的波动, 但总体呈现出增加的趋势。

在整个加载过程中,(60,70]dB 区间的信号 与试件裂缝的发展有关,因为整个加载过程中都 伴随着损伤的出现,这些损伤不断地集聚成新的 微裂缝,可以认为混凝土梁损伤发展至微裂缝的 过程中产生较多的低幅值 AE 信号。而在加载前 期产生的高幅值信号是由于钢绞线受力导致的, 当加载到第8级荷载试件即将进入破坏阶段时, 高幅值信号呈现出强烈的上升趋势,说明在荷载 持续递增的情况下,试件的裂缝快速地向截面深 处发展,直至贯通整个截面。

由上分析可知,高幅值 AE 信号[(80, +∞) dB]数量较少,构成构件的宏观裂缝;而中高幅值 [(70~80]dB]信号数量比较多,代表了混凝土的 微观裂缝。

## 4 基于 ISA 强度准则的预应力砼梁损伤 分析

根据加载过程中采集到的 AE 信号,可以用 信号强度分析(ISA)技术检测试件梁的损伤,并 对试件梁的承载力进行安全评估。信号强度分析 技术有 2 个重要的评估指标,分别为历史指标 *H* 和严重程度指数 *S*。在预应力砼梁损伤分析中, 可以通过采集损伤破坏的独立通道 AE 事件来统 计这两个指标。

历史指标 H 使用如下公式计算<sup>[7-11]</sup>:

$$H = \frac{N}{N - K} \left( \frac{\sum_{i=k+1}^{N} S_i}{\sum_{i=1}^{N} S_i} \right)$$
(1)

式中:*H*为历史指标;*N*为撞击数量;*S<sub>i</sub>*为第*i*个撞击的信号强度,mV;*K*为检测对象的经验衍生常数,对于混凝土材料,*K*可按表3取值。

表 3 历史指数的 K 值 Table 3 K values for Historical Index

撞击数 N	K
<i>N</i> ≤50	0
$51 \leq N \leq 200$	<i>N</i> – 30
$201 \leq N \leq 500$	0. 85 <i>N</i>
<i>N</i> > 500	N – 75
$51 \leqslant N \leqslant 200$ $201 \leqslant N \leqslant 500$ $N > 500$	N – 30 0. 85N N – 75

严重指数 S,使用以下方程计算:

$$S = \frac{1}{J} \left( \sum_{m=1}^{N} S_m \right) \tag{2}$$

式中:S为严重指数,mV;J为基于材料的经验衍 生常数;N为撞击数量; $S_m$ 为第m次撞击信号的 强度,mV。对于混凝土材料,J按表4取值。

#### 表 4 严重程度指标的 J 值

Table 4J	lue of so	everity ir	ıdex
----------	-----------	------------	------

	· ·
撞击数 N	J
<i>N</i> ≤50	1
<i>N</i> > 50	50

图 7 为试件不同强度区域声发射的特征,表 5 为各强度等级的含义。



图 7 强度分析图表的例子 Fig 7 Example of intensity analysis chart

表 5 强度的重要性水平 Table 5 Importance level of intensity

强度等级	描述
А	不重要的活动,基本无损伤
В	微小损伤,缺陷在汇集
С	微裂纹萌生,损伤程度提高
D	宏观裂缝,需要监测、加固
E	失效破坏

基于强度分析准则,对 C50 试件梁的 AE 信 号进行计算,得到历史指标 H 与严重程度指数 S 关系(图 8)、加载阶段与历史指标 H 关系(图 9)、 加载阶段与试件梁应变关系(图 10)。













图 9 试件各加载阶段的 H 值 Fig 9 H value of specimen at each loading stage



图 10 试件合加软阶权应受和 // 指标曲线 Fig 10 The strain and H index curves of the specimen at each loading stage

由图8可知:第1、2级荷载处于A级水平,此 时荷载主要有预应力承担,试件基本没有损伤,但 有极少的AE信号,可能是噪音;第3级荷载在B 级水平,试件从薄弱的地方开始聚合并演化成裂 纹,此时有效的AE事件逐渐出现;第4、5级荷载 处于C级水平,裂纹开始汇集成裂缝并进一步发 展;第6、7级荷载处于D级水平,在这个阶段,表 面裂缝向截面深处发展,开始出现较深的宏观裂 缝(第7级荷载出现第一条裂缝,并贯穿保护 层);第8、9、10级荷载处于E级水平,此阶段宏 观裂缝逐渐增加,到第10级荷载时出现贯穿截面 的裂缝,此时构件进入破坏失效阶段。

由图9、图10可以看出:在荷载开始阶段,由 于试件中张拉的预应力使试件下部混凝土处于受 压状态,H指数和应变均较小,试件损伤较小;随 着外部荷载的递增,AE信号的H指数显著提升, 试件承载力逐步下降,更多的裂缝贯穿截面,试件 逐渐进入失稳破坏阶段;当加载到第6级荷载附 近时H指数急剧增长,微观裂缝开始发展成为宏 观裂缝,而后较小的裂缝都会产生声发射活动。

从图 10 还可以看出:预应力钢筋砼梁的钢筋 应变与 H 指数变化趋势非常接近,均是在第 6 级 荷载发生突变,即宏观裂缝出现后曲线进入快速 上升阶段。因此,H 指数可以很好地演化试件的 损伤,可以将 H 指标的快速上升视为试件从微观 裂纹向宏观裂纹拓展的直接表现,由 H 值呈现上 升的趋势可以推断有较大的损伤出现(也即出现 宏观的裂缝)。

#### 5 结论

根据梁各阶段的损伤破坏规律,利用相关方 法对分级加载至破坏的预应力钢筋混凝土梁进行 AE 检测与信号分析,得出如下结论:

(1)试件梁加载过程中的 AE 信号与其损伤 的发展过程有很好的相关性。根据钢筋混凝土梁 各阶段的损伤特性,通过对其上升时间与幅值分 布图的分析,得出梁损伤的4个阶段,即微损伤阶 段、微裂缝形成阶段、带裂缝工作阶段和破坏失效 阶段。

(2) 在声发射分析中, 不同幅值区间的信号 代表不同损伤的类型。微裂缝的发展产生大量低 幅值信号, 而宏观裂纹的拓展产生少量的高幅值 信号, 高幅值信号能较好地体现结构重要损伤的 特性。

(3)采用 ISA 信号强度分析准则能定性评价 预应力钢筋混凝土的损伤状况,其中 H 指数能较 好地跟踪结构关键性损伤的出现,H 指数的上升 直接反映了微裂纹向宏观裂纹的发展情况。

#### 参考文献:

- [1] ANDREYKIV O Y, LYSAK M V, SERHIYENKO O M, et al. Analysis of acoustic emission caused by internal cracks [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2001,68(11):1317-1333.
- [2] ROBERTS T M, TALEBZADEH M. Fatigue life prediction based on crack propagation and acoustic emission count rates
   [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003,59(6):679-694.
- [3] 沈功田,戴光,刘时风.中国声发射检测技术进展:学会成立 25 周年纪念[J].无损检测,2003,25(6):302-307.
- [4] 李冬生,欧进萍. 钢绞线拉伸过程中的声发射特征及其损伤演化模型[J]. 公路交通科技,2007,24(9):57-60.
- [5] 李冬生,欧进萍. 声发射技术在拱桥吊杆损伤监测中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2007,23(1):6-10.
- [6] YOON D J, JUNG J C, PARK P, et al. AE characteristics for monitoring fatigue crack in steel bridge members [C]// Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2000:153-162.
- [7] SHAHIRON S, BUNNORI N M, NOORSUHADA M N, et al. Health index evaluation on acoustic emission signal for concrete structure by intensity analysis method [J]. Advanced Materials Research, 2011,403/404/405/406/407/408:3729-3733.
- [8] GOLASKI L , GEBSKI P, ONO K. Diagnostic of reinforced concrete bridge by acoustic emission [J]. Journal of Acoustic Emission, 2002,20:83-98.
- [9] NAIR A, CAI C S. Acoustic emission monitoring of bridges: Review and case studies [J]. Engineering Structures, 2010,32 (6):1704-1714.