

钢筋混凝土梁声发射检测参数设置和受力特征试验研究

门进杰, 朱 乐, 李 欢, 王晓丹

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了建立声发射参数与钢筋混凝土梁受力特征之间的关系, 进行了钢筋混凝土梁的四点弯曲试验和声发射测试试验。通过预加载和断铅试验, 给出了适用于钢筋混凝土梁的门槛值确定方法、时间参数 (峰值定义时间、撞击定义时间和撞击闭锁时间) 确定方法、声发射波速的测定方法, 以及相应的测试结果。通过四点弯曲试验和声发射测试试验, 得到了振幅、振铃计数、能量和上升时间等声发射参数随荷载的变化关系, 揭示了利用上述声发射参数表征钢筋混凝土梁受力特征的规律和方法。基于声发射参数, 通过计算得到了试件在初始开裂和屈服时的裂缝分布情况, 与试验结果相比, 在裂缝数量和裂缝位置上, 均吻合较好。

关键词: 声发射; 钢筋混凝土结构; 无损检测; 断铅试验; 基于参数的分析

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)06-0793-06

Experimental research on the acoustic emission detecting parameters and mechanical behaviors for reinforced concrete structure

MEN Jinjie, ZHU Le, LI Huan, WANG Xiaodan

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech. Xi'an 710055, China)

Abstract: Four-point bending test and AE test of a RC beam were conducted in order to capture the relations between acoustic emission (AE) parameters and mechanical characteristic for reinforced concrete (RC) structure. Procedures to determine the threshold level, time parameters (PDT, HDT, HLT) and wave velocity for RC beam were demonstrated by AE pre-test and Pencil Lead Breaks (PLBs). Relations between AE parameters, such as amplitude, ringdown count, energy and rise time, and the applied load were obtained based on four-point bending test and AE test. Then the method to assess the mechanical behaviors of RC beams by these AE parameters were established. In addition, the crack locations, when the beam began to crack and to yield, were calculated by AE parameters. The results show close correlation in the calculated crack location and crack amount with the bending test.

Key words: Acoustic emission; reinforced concrete structure; non-destructive testing; PLBs; parameter-based analysis

声发射 (Acoustic Emission, AE) 检测技术是一种重要的动态无损检测方法, 通过材料内部由于局部应变能的快速释放而产生的瞬时弹性波来判断结构内部的损伤程度, 在压力容器评价、管线泄漏探查、结构性能评估等领域得到广泛的应用^[1-2]。

在土木工程领域, 声发射检测的主要目的, 是通过 AE 波形或 AE 参数的分析, 得到材料或构件的受力特征, 进而评估结构的受力性能。目前, 针对声发射参数与混凝土材料损伤变量之间的耦合关系已有不少的研究。Sadowska 等^[3]通过试验研究, 给出了混凝土强度与声发射参数之间的关系。Ohtsu 等^[4]提出了声发射速率过程理论, 建立了声发射参数与混凝土应力水平之间的关系。李旭和李宏男等^[5]利用能量平衡原理, 建立了声发射参数与断裂力学参数的耦合关系。江煜和许飞云等^[6]利用声发射层析成像, 通过波速变化慢度图来定位结构的损伤位置。

然而, 在钢筋混凝土结构中, 由于钢筋的存在, 改变了混凝土的受力性能, 且对 AE 波的传播会产生一定的影响。因此, 素混凝土材料和构件的 AE 检测方法是否适用于钢筋混凝土构件, 尚需大量的试验验证。本文主要通过试验研究, 在对钢筋混凝土梁声发射检测参数设置研究的基础上, 对 AE 参数进行分析和计算, 拟揭示利用 AE 参数评估钢筋混凝土梁主要受力特征参数 (开裂荷载和屈服荷载) 的规律和方法。

1 钢筋混凝土梁声发射检测参数的确定

检测参数的合理确定是声发射检测结果正确与否的关键。目前, 针对金属材料声发射检测参数设置的研究较为成熟, 而对混凝土材料, 特别是钢筋混凝土材料声发射检测参数的研究较少^[7]。声发射的检测参数主要有检测门槛 (阈值)、相关的

收稿日期: 2015-07-13 修改稿日期: 2015-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51008244, 51178380); 陕西省自然科学基金研究计划基金项目 (2015JM5173, 2014JQ7245, 2014KJXX-67)

作者简介: 门进杰 (1979-), 男, 教授, 博士, 主要从事结构理论分析、建筑结构及其抗震的研究。Email: men2009@163.com

时间参数和声发射波的波速等。

1.1 声发射检测门槛的确定

门槛值是声发射信号参数的检测阈值。确定门槛值主要是为了滤掉检测现场的噪声。文献[8]表明,一般无损检测的门槛值是 35~55dB,试验条件和材料不同时门槛值也会不同。本文采用预加载试验的方法来确定钢筋混凝土梁检测门槛值的大小。

1.1.1 预加载试验的前期准备

在钢筋混凝土梁试件安装就位后(正式加载试验概况见后文),在梁的前后表面同一位置处各取一个测点,并粘贴声发射传感器,如图 1 所示。



图 1 传感器布置照片(预加载试验)

Fig.1 Photo of AE sensor location (for pre-test)

首先把门槛值设置为一较小值,如 20 dB,然后在不加载的情况下分析声发射信号。此时,仍能接收到很多平稳的信号。这些信号在每单位时间产生的能量近似相等,两个传感器收到的信号幅值也基本一样。由此可知,门槛值为 20 dB 时会收集到噪声信号。故将其提高到 25 dB 和 30 dB,结果相同,故还需再提高。当门槛值为 35 dB 时,不但没有撞击事件出现,同时信号的能量也为 0,说明此时未加载也未接收到噪声信号。

1.1.2 预加载和钢筋混凝土梁检测门槛取值

由前述分析可知,本文钢筋混凝土梁检测门槛的最低取值为 35 dB。考虑到试验加载过程中可能出现的不确定噪声,将该值提高到 40 dB。进行预加载。一次施加 2%的 F_u (F_u 为预估的最大荷载值),并对声发射信号进行分析。此时只采集到极少数的声发射信号,且没有声发射事件出现。因此,以 40 dB 作为门槛值是合理的。

综上所述,本文建议采用 35~45 dB 作为类似钢筋混凝土梁的声发射检测门槛值。

1.2 声发射时间参数的确定

1.2.1 时间参数简介

声发射的时间参数主要包括:峰值定义时间(PDT)、撞击定义时间(HDT)和撞击闭锁时间(HLT)。峰值定义时间是为正确确定撞击信号的上升时间而设置的最大峰值等待时间,应尽量短一

些,然而若选择的间隔太短,则会把高速、低幅度的前驱波误认为主波分析处理,所以确定该参数时要谨慎。撞击定义时间是为了正确确定撞击事件终点而设置的撞击信号等待时间。若过长会把几个撞击误认为只有一个撞击;若过短则会把一个撞击误认为几个撞击。一般为了能真实的识别并描述 AE 信号,常常使撞击定义时间设置为峰值定义时间的 2 倍^[7]。撞击闭锁时间是为了避免采集到反射波或迟到波而设置的关闭测量电路的时间间隔。为了使噪声干扰得以有效消除,该时间间隔必须足够长。

1.2.2 时间参数的确定方法

文献[8]给出了不同类型材料时间参数的取值范围,以供技术人员参考,见表 1。

表 1 时间参数的取值范围
Tab.1 Range of time parameters

材料或试件	PDT/ μ s	HDT/ μ s	HLT/ μ s
复合材料	20~50	100~200	300
金属小试件	300	600	1 000
高衰减金属构件	300	600	1 000
低衰减金属构件	1 000	2 000	20 000

从表 1 中可以看出,AE 信号在不同材料中的传播特性有很大差别。对于钢筋混凝土构件,由于影响其声发射特性的因素众多,例如,混凝土的组成、配合比、强度以及钢筋的存在等,因此,很有必要通过试验确定其声发射检测时间参数的具体取值。

(1) 断铅试验概况

采用断铅试验确定适用于钢筋混凝土梁构件的时间参数。断铅采用 0.5 mm 的 HB 笔芯。传感器测点的布置与门槛值测定试验中的相同(图 1)。2 个测点之间的距离为 120 mm。为了能接收到断铅信号,往往会初始假定时间参数,初始选取 $PDT=50\mu s$, $HDT=200\mu s$, $HLT=300\mu s$ 。断铅试验时,将铅笔芯放置在 1 号传感器所在梁的表面,连续做 20 次断芯,注意必须保持每次断芯的角度相同,铅芯每次伸长量均为 2.5 mm。如此,2 号传感器共接收到 20 次断芯脉冲信号,其中的上升时间见表 2 所示。

表 2 上升时间的测试结果/ μ s
Tab.2 Test result of rise time / μ s

次数	上升时间	次数	上升时间	次数	上升时间	次数	上升时间
1	32.7	6	32.4	11	33.9	16	33.0
2	33.3	7	32.7	12	33.5	17	33.1
3	32.8	8	32.4	13	33.4	18	33.6
4	33.6	9	33.7	14	32.5	19	33.7
5	33.4	10	33.5	15	33.2	20	34.2
平均值		33.23		变异系数		0.015	

从表 2 可以看出, 由断铅试验得到的声发射信号上升时间均处于 32.4~34.2 μs 之间, 均值为 33.23 μs , 变异系数为 0.015, 离散性较小, 表明本次断铅试验结果较为理想, 可作为时间参数的确定依据。

(2) 时间参数的确定

对表 2 中得到的上升时间均值适当放大作为峰值定义时间, 本次试验峰值定义时间取为 50 μs 。由上述时间参数的定义可知, 撞击定义时间为峰值定义时间的 2 倍, 故可取为 100 μs ; 而撞击闭锁时间一般均比撞击鉴别时间大一些, 所以取 250 μs 作为撞击闭锁时间值。由断铅试验确定的时间参数, 峰值定义时间 50 μs , 撞击定义时间 100 μs 撞击闭锁时间 250 μs 。

因此, 在进行与本文类似试件的既有结构构件的声发射检测时, 可以参考上表来确定相应的时间参数。

1.3 声发射波波速的测定

声发射波的波速是确定裂缝开裂点的重要依据, 因此, 在评估钢筋混凝土梁试件的裂缝位置之前, 需要测定波在钢筋混凝土中的传播速度。研究表明, 声发射波在钢筋混凝土试件内部的传播机理较为复杂, 还会产生反射、折射等现象; 此外, 试件的组成、强度和配筋等均会对波速产生影响。本文仍采用断铅试验的方法测定声发射波的波速。

测定波速时的断铅试验的传感器测点布置与门槛值测定试验中的相同 (图 1)。具体的试验步骤为: (a) 在其中的 1 个测点处连续断铅 20 次, 断铅要求与前文相同。(b) 记录初波信号 (P 波) 分别到达两测点的时间。(c) 根据两个测点之间的距离 (即梁宽 120 mm), 以及信号到达两传感器的时间差即可计算出 AE 信号在试件内的传播速度。按上述步骤测得的声发射波在钢筋混凝土梁中的传播速度见表 3。

表 3 波速测试结果
Tab.4 Test result of AE wave velocity

次数	波速 /m·s ⁻¹	次数	波速 /m·s ⁻¹	次数	波速 /m·s ⁻¹	次数	波速 /m·s ⁻¹
1	4 669.3	6	4 332.1	11	4 633.2	16	4 511.3
2	4 687.5	7	4 363.6	12	4 545.5	17	4 428.0
3	4 379.6	8	4 347.8	13	4 460.9	18	4 580.2
4	4 562.7	9	4 580.2	14	4 363.6	19	4 615.4
5	4 511.3	10	4 562.7	15	4 494.4	20	4 687.5
平均值		4 515.8		变异系数		0.025	

从表 3 可以看出, 由断铅试验得到的波速最小值为 4 332.1 m/s, 最大值为 4 687.5 m/s, 均值为 4

515.8 m/s, 变异系数为 0.025, 离散性较小, 表明本次试验测得的波速结果较为理想, 可作为计算裂缝位置的依据。

需要说明的是, 声发射波在不同材料中的波速值不同, 其在同一材料或试件的不同损伤阶段的波速值也是不同的。为了便于声发射检测试验的进行, 往往假定断铅试验求得的平均波速值就是声发射信号在钢筋混凝土梁中的传播速度。

2 试验概况

2.1 试件设计

本次试验所用试件是钢筋混凝土简支梁, 尺寸为 2 800 mm (长) × 120 mm (宽) × 180 mm (高)。按照适筋梁进行配筋。混凝土的强度等级为 C20, 受拉纵筋为 2 Φ 14, 受压纵筋为 2 Φ 8, 箍筋为 Φ 6@100, 试件的配筋见图 2。

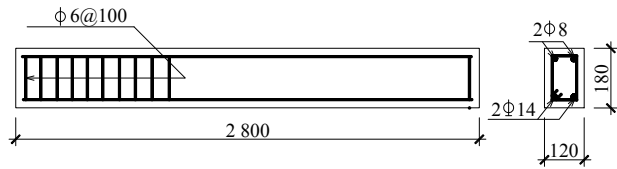


图 2 钢筋混凝土梁配筋图
Fig. 2 Reinforcement of RC beam

2.2 试验加载和测试

试验采用的设备和装置如图 3 所示。试验设备包括试验台座、千斤顶、分配梁等。千斤顶施加的竖向荷载通过两端支撑于三分点处的分配梁传递给试件; 荷载大小通过荷载传感器测试。在试件跨中布置位移计、在试件两端布置千分表以测试其跨中位移。此外, 在跨中截面的 2 根受拉纵筋和 2 根受压纵筋上分别布置两个应变片, 以测试其纵筋应变; 在跨中混凝土表面沿高度方向布置 5 个混凝土应变片。上述荷载、应变和挠度均通过 TDS602 动态采集仪进行采集和记录。

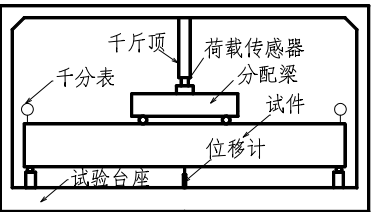


图 3 试验加载装置
Fig.3 Experiment equipments

试验时, 采用手动油压千斤顶进行分级加载, 在试件屈服前每级加载 5 kN, 屈服后每级加载 3 kN。每级加载完成后, 保持 2 min, 以方便描绘裂

缝和进行声发射信号的初步分析。

2.3 试验现象和主要结果分析

2.3.1 试验现象

当加载到约 5 kN 左右(开裂荷载)时,在梁侧面出现第一条竖向裂缝;之后随着荷载的增大,梁侧面陆续出现多条裂缝,且裂缝宽度不断变大,同时沿着梁高方向向上发展,有向跨中加载点处靠拢的趋势。到了加载后期,梁的挠度明显加大,裂缝不断增多,且在梁的顶面也出现裂缝。直到加载到约 40 kN(极限荷载)时,跨中裂缝上下贯通,梁顶面的混凝土发生剥落,此时梁被压坏,失去承载能力。梁的最终破坏形式如图 4 所示。

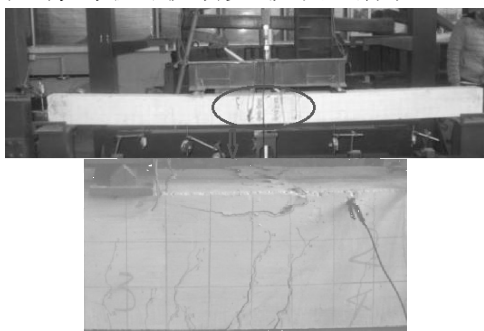


图 4 梁的最终破坏形态

Fig.4 Failure mode of the beam

2.3.2 荷载-挠度曲线

试验得到的荷载-跨中挠度曲线见图 5。可以看出,刚加载时,两者的关系为直线,试件处于弹性阶段。荷载达到约 5.7 kN 时,曲线的斜率开始降低,表明混凝土已经开裂。随着荷载的增加,曲线逐渐偏向挠度轴,表明裂缝的不断发展对跨中截面的刚度影响很大。加载后期,挠度急剧增加,试件逐渐失去承载力,试件达到破坏状态。

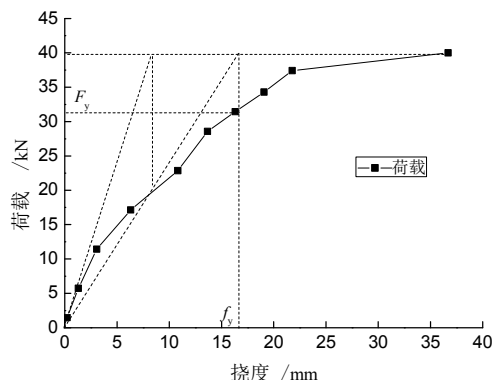


图 5 荷载-跨中挠度关系图

Fig.5 Load and midspan displacement curve

由于从试验数据和图 5 中不能明显看出试件的屈服荷载,因此,采用几何作图法,结合试验结果,得到试件的屈服荷载(F_y)约为 31.5 kN,对应的屈服挠度(f_y)约为 16.5 mm。

3 钢筋混凝土梁受力特征评估

3.1 声发射测试方案

在对钢筋混凝土梁试件进行竖向加载的同时,利用声发射系统对加载过程中的 AE 信号进行采集和处理。声发射的测试区域位于试件纯弯段和弯剪段的结合部,共布置 4 个测点,见图 6。

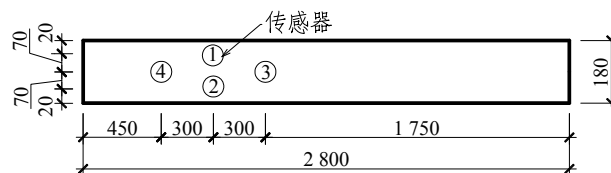


图 6 声发射测点布置

Fig.6 Arrangement of AE sensors

3.2 初裂荷载和屈服荷载的评估

对于钢筋混凝土梁来说,开裂荷载(F_{cr})和屈服荷载(F_y)是其受力特征的两个重要参数。本文拟通过对 AE 信号进行分析,探讨其 AE 参数与上述两个关键参数之间的关系。

根据试验加载和声发射测试的相应时间记录,将每个加载阶段的声发射参数提取出来,分别对每个测点的 AE 信号进行分析,可建立 AE 参数(振幅、振铃计数、能量和上升时间等)与荷载之间的关系,如图 7 所示。由于篇幅所限,本文仅给出 3 号测点的结果,其他 3 个测点的规律相同。

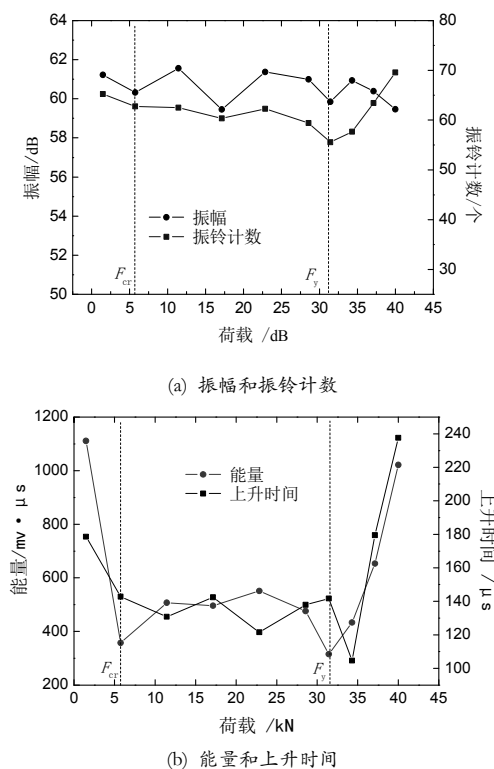


图 7 AE 参数-荷载曲线(3 号测点)

Fig.7 AE parameters and load curves (for No.3 sensor)

从图 7 可以看出,在整个加载过程中,各 AE 参数的变化规律是不同的. AE 信号的振幅随荷载的增大没有明显变化,一直保持在 59.5~61.5 dB 之间.表明 AE 信号的振幅与钢筋混凝土梁的开裂荷载和屈服荷载之间,没有明显的关系.这也说明,在不同加载阶段,各混凝土裂缝的出现和发展是比较均匀和均衡的.振铃计数表示的是 AE 波活动性的大小.从图 7(a)可以看出,在屈服荷载之前,振铃计数的变化范围不大,处于 59~65 个之间,相差比率不到 10%;而在屈服荷载之后,振铃计数有一个明显的上升段,从 55 个增大到 70 个,增大比率为 27%,表明混凝土裂缝的发展和变化在试件屈服之后显著增大.因此,本文建议可以利用振铃计数的变化情况来评估钢筋混凝土梁的屈服荷载:当振铃计数的变化率由一个相对稳定的较小值突然增大时,相应的荷载很有可能就是其屈服荷载.上升时间是 AE 波从第一次超过阈值到第一次达到峰值振幅所需的时间,可用于对结构破坏类型分类^[1].从图 7(b)可以看出,在开裂荷载与屈服荷载之间,AE 波的上升时间变化不大,分析原因,该阶段主要是体现为弯曲破坏特征;而在屈服荷载之后,上升时间明显增大,分析原因,钢筋混凝土梁在屈服之后,受剪破坏的特征逐渐增大.能量可以反映 AE 源事件的强度大小^[1],虽然它不是真正物理意义上的能量值,但从图 7(b)可以看出,可以用该参数表征钢筋混凝土梁的开裂荷载和屈服荷载.即,在试件初裂时,能量显著降低,能量曲线有突变;而在试件进入屈服阶段时,能量又显著增加,能量曲线也有突变;中间阶段,由于裂缝发展比较平稳,故能量曲线也变化不大.

3.3 裂缝位置的评估

声发射测试时,若声发射源 $X_0(x_0, y_0, z_0)$ 在 t_0 时刻产生的事件,被传感器 $X_i(x_i, y_i, z_i)$ 接受到的时间为 t_i ,则两点之间的距离 d_i 可用式(1)表示:

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (1)$$

利用 AE 波的传递时间差, d_i 还可以表示为

$$d_i = V_p(t_i - t_0) \quad (2)$$

式中, V_p 是 P 波的波速.

利用上述两式即可组成声发射波源坐标的方程组.求解方程组,即可得到声发射波源点的坐标,即为裂缝开裂位置.在平面结构中,若要确定一个裂缝开裂点,至少需要 3 个测点数据,而在三维结构中,至少需要 4 个测点数据.

对 4 个测点的 AE 信号进行分析和计算,得到试件在初裂和屈服时的裂缝位置分布见图 8 (图中的纵、横向刻度单位分别为 5 cm 和 6 cm).

从图 8(a)可以看出,对于两条初始裂缝,基于 AE 参数计算得到的裂缝位置与试验结果吻合较好.分别位于 2 号测点右侧约 10 cm 和 22 cm 处.对于屈服荷载时的裂缝分布,从图 8(b)可以看出,基于 AE 参数计算得到的裂缝位置分布范围较广,点较密集的区域可以看作是主要裂缝的形成区.对于测试区域(4 个测点的包围区)的右半区,计算结果与试验结果符合较好,均有 3 条较明显的裂缝,且位置误差不超过 1 cm.对于测试区域的左半区,计算结果与试验结果略有差别,虽然均有 3 条相对明显的裂缝,但裂缝位置误差相对较大,约为 4 cm.分析原因,可能是受测点数量和布置形式的影响而产生.

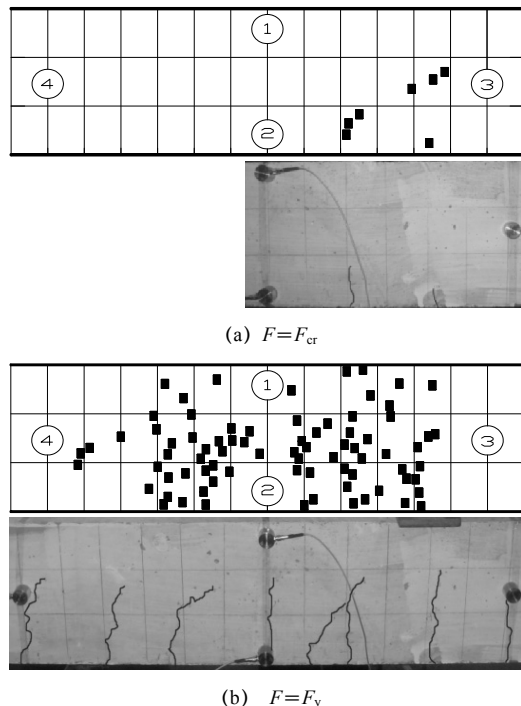


图 8 裂缝位置对比图

Fig.8 Comparison of the crack locations

4 结论

通过试验研究,给出了钢筋混凝土梁声发射检测参数的设置方法,揭示了利用 AE 参数表征钢筋混凝土梁主要受力特征的规律和方法,主要结论:

(1) 通过预加载试验,得到了适用于钢筋混凝土梁的阈值确定方法,建议采用 35~45 dB 作为类似构件声发射检测的阈值.

(2) 通过断铅试验,阐述了确定时间参数 (PDT、HDT、HLT) 和测定声发射波速的要点和

步骤. 给出了适用于钢筋混凝土梁的相应时间参数的确定值和波速的测定值.

(3) 通过钢筋混凝土梁四点弯曲试验和声发射测试, 得到了振幅、振铃计数、能量和上升时间等 AE 参数随荷载的变化关系, 以及试件在初裂和屈服时的裂缝位置情况.

(4) 振幅虽然与开裂荷载、屈服荷载之间没有明显关系, 但可以表征试件受力过程中裂缝发展的均衡性. 振铃计数可用来评估钢筋混凝土梁的屈服荷载, 即, 振铃计数曲线上的突变点. 利用能量曲线的突变点, 可用来表征钢筋混凝土梁的开裂荷载和屈服荷载. 此外, 在屈服荷载之后, 上升时间也明显增大.

(5) 对于初始裂缝, 基于 AE 参数计算得到的裂缝位置与试验结果吻合较好; 对于屈服荷载时的裂缝分布, 在裂缝的数量上, 两种结果吻合较好, 在裂缝位置上, 误差为 1~4 cm.

参考文献 References

- [1] GROSSE C U, Ohtsu M. Acoustic emission testing: basic for research-applications in civil engineering [D]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [2] 纪洪广, 张天森, 蔡美峰, 等. 混凝土材料损伤的声发射动态检测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 165-168.
JI Hongguang, ZHANG Tiansen, CAI Mengfeng, et al. Experimental study on concrete damage by dynamic measurement of acoustic emission[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 165-168.
- [3] SADOWSKA B. Application of acoustic emission to investigate the mechanical strength of ceramic materials[J]. Journal of Ceramic Society of Japan, 1984, 12 (8): 639-642.
- [4] Ohtsu M. Rate process analysis of acoustic emission activity in core test of concrete[J]. Proc. of JSCE, 1992, (16): 211-217.
- [5] 李旭, 霍林生, 李宏男. 基于声发射的钢筋混凝土梁承载能力评估[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 6-9.
LI Xu, HUO Linsheng, LI Hongnan. Based on the acoustic emission of the reinforced concrete beam carrying capacity evaluation [J]. Vibration and Shock, 2013, 32(5): 6-9.
- [6] 江煜, 许飞云, 许丙胜, 等. 声发射层析成像技术在混凝土结构中的应用[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2014, 44(4): 822-825.
JIANG Yu, XU Feiyun, XU Bingsheng, et al. Application of acoustic emission tomography in concrete structures [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014, 44(4): 822-825.
- [7] 欧阳利军, 陆洲导, 赵艳林, 等. 混凝土结构声发射检测参数设置研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(5): 37-41.
OUYANG Lijun, LU Zhoudao, ZHAO Yanlin, et al. The setting of acoustic emission detecting parameters in concrete structure [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(5): 37-41.
- [8] 国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材. 声发射检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
National defense science and technology industrial nondestructive testing personnel qualification and certification training materials. Acoustic emission detection[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2005

(编辑 沈波)

(上接第792页)

- LI Bo, YANG Qingshan. Experimental research on a seismic behavior of steel moment-resisting frame with opening on beam web[J]. Journal of Building Structures, 2007(6): 160-166.
- [9] 郁有升, 王燕. 钢框架梁翼缘削弱型节点力学性能的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 2(26): 168-175.
YU Yousheng, WAN Yan. Experimental study on the mechanical property of reduced beam section connections of steel frames[J]. Engineering Mechanics, 2009, 2(26): 168-175.
- [10] 杨娜, 纪万金. 考虑组合效应的梁腹板开孔型节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2013(2): 34-40.
YANG Na, JI Wanjin. Experimental study on seismic behavior of connections with opening on beam web considering the composite effect[J]. China Civil Engineering Journal, 2013(2): 34-40.

- [11] JGJ 99-98 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
JGJ 99-98 Technical specification for steel structure of tall buildings[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 1998.
- [12] JGJ 101-96 建筑抗震试验方法规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
JGJ-101-96 Specification of Testing Methods for Earthquake Resistant Building[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 1997.

(编辑 桂智刚)