

# 基于声发射信号表征混凝土断裂过程的异常现象

范向前, 胡少伟, 陆俊

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 混凝土作为一种人工石材, 由于浇筑过程的影响, 其断裂破坏过程不可避免地存在一定随机性。利用声发射实时动态无损监测技术, 分析了带预制裂缝混凝土三点弯曲梁试件裂缝扩展发生偏移和钢筋混凝土三点弯曲梁破坏荷载循环增减等特殊试验现象存在的客观性。试验分析发现, 预制裂缝尖端粗骨料的存在, 致使裂缝并非沿着预制裂缝直接向前扩展, 而是出现绕道扩展的现象; 配筋率过大时, 钢筋混凝土三点弯曲梁试件的破坏荷载值将维持在钢筋极限屈服强度附近循环变化。可见, 钢筋混凝土三点弯曲梁试件的失稳荷载取决于配筋率的高低。研究成果表明声发射技术可为开展混凝土损伤断裂试验提供一种新的研究手段。

**关键词:** 混凝土; 断裂过程; 声发射; 裂缝; 循环荷载

**中图分类号:** TV313

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2014)03-0026-06

混凝土作为一种非均质多相准脆性材料, 其内部不可避免存在空隙、微裂缝等缺陷。大量试验研究和工程实践表明, 混凝土结构开裂几乎是不可避免的, 为了摸清混凝土断裂破坏规律, 国内外学者进行了大量的断裂试验<sup>[1-7]</sup>。范向前<sup>[8]</sup>采用预制裂缝三点弯曲梁试件对混凝土断裂过程进行了系列研究, 发现由于混凝土材料的非均质多相性, 部分试件的损伤断裂破坏过程出现了特殊试验现象, 而无法采用常规方法进行解释。

声发射技术作为一种结构材料性能研究的有力手段, 在混凝土领域的应用已具有悠久的历史<sup>[9-13]</sup>。本文在开展带预制裂缝混凝土三点弯曲梁损伤断裂试验中, 创新性地将声发射技术贯穿于整个试验过程, 为实时动态监测断裂试验过程中混凝土试件的损伤断裂演化规律提供了新的研究手段, 并对带预制裂缝混凝土三点弯曲梁断裂试验过程中出现的特殊试验现象给出了合理解释。

## 1 混凝土断裂声发射试验

### 1.1 试件设计

本文所用试验资料参见文献[8], 主要包括混凝土三点弯曲梁和钢筋混凝土三点弯曲梁两类试件, 尺寸为1 000 mm×120 mm×200 mm(长×宽×高)。初始设计强度分别为25, 35和60 MPa。钢筋混凝土三点弯曲梁主要基于普通混凝土三点弯曲梁试件, 并在其底部配置一排2根光圆钢筋, 钢筋直径分别为6, 8和10 mm 3种。所用混凝土主要组成材料包括水、P·O42.5级水泥、细度模数为2.6的天然河砂、粒径5~20 mm连续粒级颗粒级配的碎石、UC-II型外加剂, 拌制混凝土和砂浆用I级粉煤灰, S95高炉矿渣粉。具体配合比见表1。

所有试件均采用满足刚度要求的木模板进行成型。采用厚度为3 mm, 且一侧带有30°尖角的钢板预埋在三点弯曲梁试件底部中间部位形成初始预制裂缝, 初始预制裂缝长度分40, 60, 80和100 mm等4种。试

收稿日期: 2013-10-29

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51325904); 水利部公益性行业科研专项(201201038); 中国博士后科学基金资助项目(2014M551624); 江苏省博士后科研资助计划项目(1302055B); 南京水利科学研究院博士后科研基金

作者简介: 范向前(1982-), 男, 河南郑州人, 博士后, 主要从事水工结构工程与材料研究。E-mail: xqfan@nhri.cn

通信作者: 胡少伟(E-mail: hushaowei@nhri.cn)

件浇筑完成后,根据设计强度等级,初始预制裂缝长度等参数,并结合实际情况,对混凝土硬化状态进行实时观察,5~8 h内取出预埋钢板,形成中部带预制裂缝的标准三点弯曲梁试件,并于浇筑完成24 h后拆除模板,摆放整齐,加以覆盖并保湿养护,室外养护时间为60 d。试件详细设计情况见表2。

表1 配合比

Tab.1 Mix proportion

强度等级/MPa	水泥	粉煤灰	矿渣粉	外加剂	水	砂	石	砂率/%
C25/RC25	0.72	0.13	0.15	0.01	0.54	2.42	3.21	43
C35/RC35	0.72	0.12	0.16	0.01	0.47	2.04	2.81	42
C60/RC60	0.84	0.08	0.08	0.018	0.31	1.03	1.94	35

注:水泥、粉煤灰、矿渣粉组成胶凝材料,计为基准值1。

表2 标准三点弯曲梁试件设计参数值

Tab.2 Design parameter values of standard three-point bending beam specimens

试件类型	试件编号	强度等级/MPa	预制缝长/mm	钢筋直径/mm
混凝土 三点弯曲梁	C25	25	40,60,80,100	—
	C60	60	60,80	—
	C35	35	40,60,80,100	—
钢筋混凝土 三点弯曲梁	RC25	25	80	8
	RC60	60	40,60,80,100	6,8,10
	RC35	35	80	8

1.2 试验概况

声发射仪器工作范围包括声电转换、信号放大、信号处理、数据的记录、显示、解释与评定等,其基本工作原理如图1所示。材料或结构在受到外部或内部作用时会发生变形或断裂,释放出应变能,以弹性波的形式在材料中传播,引起被检测试件表面的振动,当这些振动传播到耦合在试件上的传感器时,传感器表面晶体因此产生变形,同时其表面会出现电荷,在电场的作用下,芯片会产生弹性变形,发生压电效应。该压电效应将试件表面的振动转换成电压信号,再通过仪器放大处理后以参数或者波形的形式表现出来,便于信号处理。

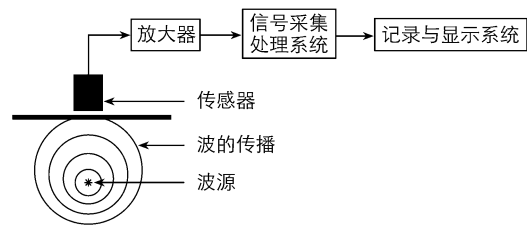


图1 声发射技术基本原理

Fig.1 The fundamentals of acoustic emission technology

本次混凝土损伤断裂试验所用声发射仪为美国声学物理公司研制的SAMOSTM八通道声发射测试系统,该系统采用现代数字信号处理技术。试验中,为了使传感器接收更加优质的声发射信号,并避免外界干扰,在声发射传感器布置前,用砂纸在传感器布置的地方打磨光滑,并涂上凡士林作为耦合剂,保证声发射传感器和混凝土试件表面垂直并接触良好。

按照图2所示( $F$ 为荷载值, $L=1\ 000\text{ mm}$ 为试件长度, $S=800\text{ mm}$ 为两支座间的跨度, $t=120\text{ mm}$ 为试件厚度, $h=200\text{ mm}$ 为试件高度, $a_0$ 为预制裂缝长度),在试件两侧共计布置8个声发射传感器(括号内数字代表声发射传感器布置在试件对面),每个声发射传感器距离试件上下表面20 mm,距离左右表面150 mm,形成三维空间定位,并用胶带将声发射传感器固定在试件表面以防脱落。

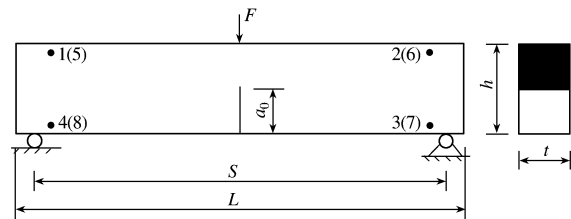


图2 声发射传感器布置

Fig.2 Arrangement of AE sensors

为了保证试验开始后声发射传感器可以正常工作,并验证声发射系统的门槛值和波速值,所有仪器连接完毕并准备开始试验之前,首先对8个声发射传感器通过“断铅”进行标定。

试验过程不可避免出现仪器噪声或外部噪音,从而影响试验结果精度。可以通过两种办法去除环境噪声对声发射试验结果的影响,一种是设置门限值,另一种是设置滤波频率。本文的三点弯曲梁声发射试验,由于受力状态单一,破坏特征明显,故设置高灵敏度的门限值来排除内部缺陷的干扰,通过试验机的空采和混凝土试件损伤声发射频率段测试,本次声发射试验门限值设置为 40 dB,滤波频率为 20 ~ 100 kHz。在试件的初始损伤阶段,声发射信号相对较弱,通过设置增益来提高信号强度。

试验过程除了测试三点弯曲梁试件三维空间内声发射信号外,还测试出沿加载方向应变片的应变值以及试件荷载值。其中,试件荷载值和混凝土的应变值通过 DH-3817 型动态应变测试系统进行采集,采用连续采集模式,每 3 s 记录并采集 1 次荷载数据,声发射试验过程如图 3 所示(各字母含义同图 2)。

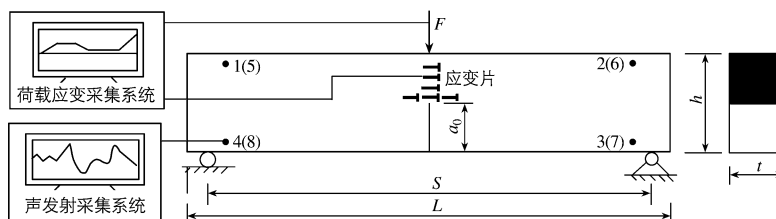


图3 声发射试验装置

Fig. 3 Scheme of AE experimental set-up

所有试验均在 5 000 kN 压力机上进行,初始加载速率控制在 10 N/s,平稳加载至极限荷载的 50% 后,按加载速率 1 N/s 加载直至试件开裂破坏。

## 2 声发射信号表征裂缝偏移扩展

根据双  $K$  断裂模型<sup>[14]</sup>,带预制裂缝混凝土三点弯曲梁试件,其断裂破坏过程包括:初始开裂,稳定扩展和失稳破坏 3 个阶段。在初始开裂和失稳破坏时刻,由于能量的迅速释放,声发射参数均会出现峰值信号<sup>[15]</sup>。然而,试验过程中发现,部分混凝土三点弯曲梁试件声发射信号并非完全符合上述规律,如图 4(a)和图 5(a)所示,混凝土三点弯曲梁试件声发射振铃计数率-时间曲线和能量-时间曲线均只有一个峰值信号,且该峰值信号对应的数值相对异常。

为了研究出现此类现象的真实原因,作者在进行后期处理中,将声发射振铃计数率-时间曲线和能量-时间曲线中唯一的一个声发射峰值信号剔除,仅保留剩余信号,如图 4(b)和图 5(b)所示,分别绘出了略去唯一一个声发射峰值信号后的振铃计数率-时间曲线和能量-时间曲线。此时,相应地出现了两个声发射峰值信号,且通过对比分析图 4 和图 5 可以得到混凝土三点弯曲梁试件的起裂时刻和失稳破坏时刻,即原始声发射振铃计数率-时间曲线和能量-时间曲线中唯一的一个声发射峰值信号掩盖了混凝土三点弯曲梁试件起裂荷载和失稳荷载所对应的声发射峰值信号。

对比分析混凝土三点弯曲梁试件断裂过程声发射曲线和损伤断裂试验现象,当混凝土三点弯曲梁试件成型时,粒径较大的粗骨料恰好被浇筑在预制裂缝尖端。

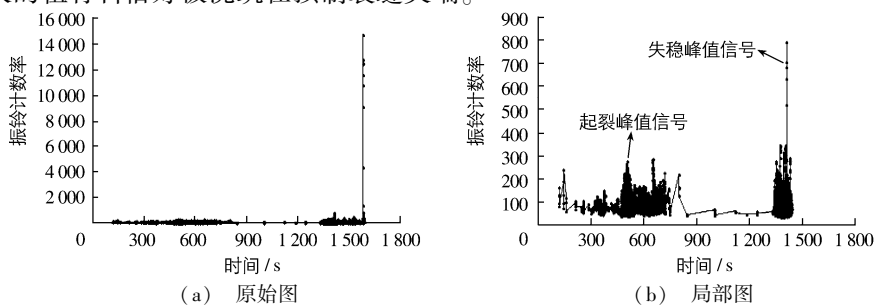


图4 裂缝尖端存在粗骨料时振铃计数率与时间关系

Fig. 4 Relative curves between ringing counts rate and time having coarse aggregate on the crack tip

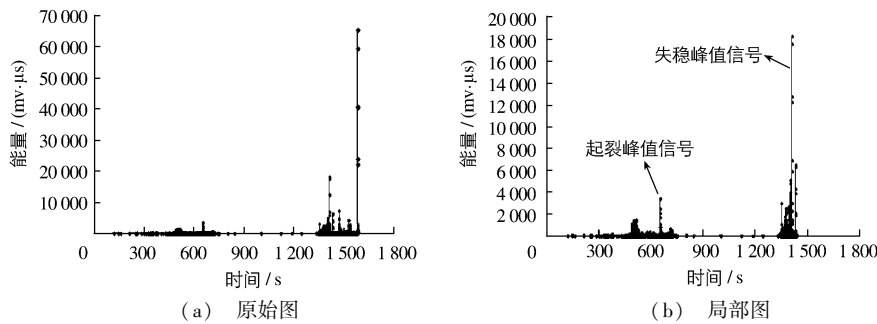


图5 裂缝尖端存在粗骨料时能量与时间关系

Fig.5 Relative curves between energy and time having coarse aggregate on the crack tip

断裂试验过程中,随着荷载的增加,由于混凝土三点弯曲梁试件预制裂缝尖端粗骨料的阻挡,裂缝被迫绕过粗骨料,然后继续向前扩展。尽管裂缝围绕粗骨料向前扩展过程中会产生声发射信号,但是相对于裂缝绕过粗骨料到失稳破坏瞬间产生的声发射信号强度要弱很多,因此,其声发射参数曲线图中不能显示出这些峰值信号,仅仅出现了裂缝绕过粗骨料后失稳破坏那一瞬间所产生的声发射异常峰值信号。

为了进一步验证上述分析结果的准确性,针对出现上述情况的所有混凝土三点弯曲梁试件,调出试验过程中拍摄的断裂破坏照片,选择图4和图5对应的试验照片,如图6所示。由图6可清晰发现,由于初始预制裂缝尖端粗骨料的存在,裂缝扩展过程并非沿着预制裂缝向前发展,而是出现绕道扩展的情况,即混凝土三点弯曲梁试件主裂缝在扩展初期就发生了偏移,这一现象进一步验证了图4(a)和图5(a)中声发射参数仅出现一个峰值信号且数值较大的异常试验现象。

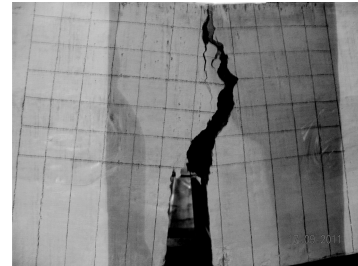


图6 裂缝扩展发生偏移

Fig.6 Cracking migration

### 3 声发射信号表征荷载的循环增减

类似于混凝土三点弯曲梁试验断裂过程中声发射信号存在的异常现象,钢筋混凝土三点弯曲梁试件断裂破坏过程声发射信号曲线中,同样有异常情况的出现,如图7所示。带预制裂缝钢筋混凝土三点弯曲梁试件发生失稳断裂破坏前后,其声发射振铃计数率和能量信号循环出现较大的数值,为了探明出现该异常现象的真正原因,本文对此进行了深入研究。

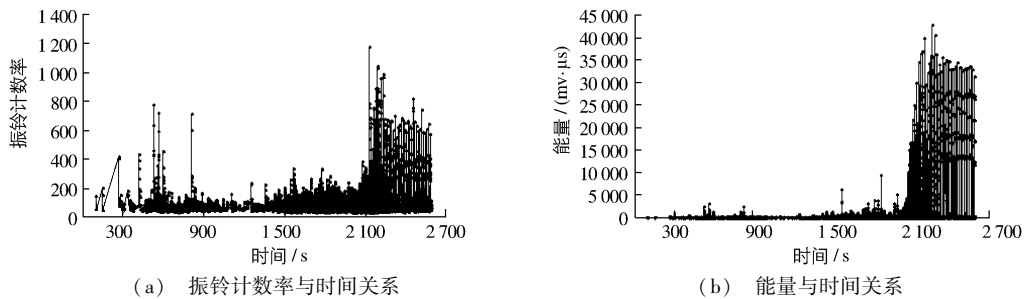


图7 配筋率过大时振铃计数率及能量与时间关系

Fig.7 Relative curves among ringing counts rate and energy and time during over reinforcement rate

为了分析出现图7所示异常试验现象的真正原因,结合试验实际情况,图8(a)给出了钢筋混凝土三点弯曲梁试件的荷载-时间关系曲线。由于钢筋混凝土三点弯曲梁试件断裂过程中,声发射多次出现峰值信号主要发生在试件失稳断裂破坏荷载左右,为此,针对图8(a)中荷载-时间关系曲线,对钢筋混凝土三点弯



曲线段发生失稳破坏前后的曲线段进行局部放大并单独列出,如图8(b)所示。

由图8(b)钢筋混凝土三点弯曲梁试件荷载-时间曲线可知,荷载过了最大值之后,钢筋混凝土三点弯曲梁试件的荷载值在某一范围内循环增加和骤降,荷载值的这一变化规律恰好对应图7中声发射信号连续多次出现峰值的区域。不难理解,当钢筋混凝土三点弯曲梁试件荷载值发生骤降时,结构内部的平衡状态被打破,释放能量,从而产生大量的声发射信号。

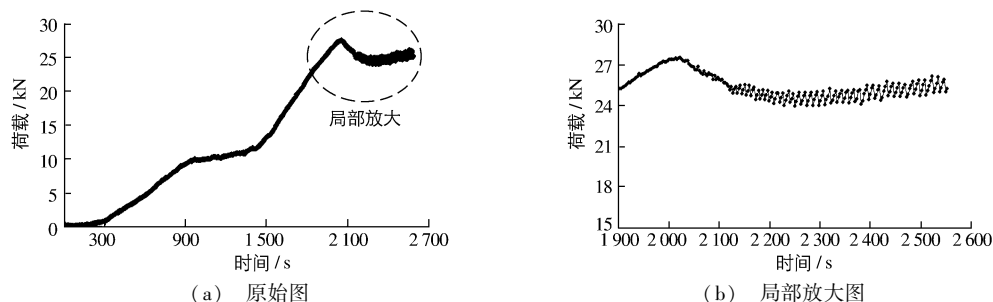


图8 配筋率过大时荷载与时间关系

Fig. 8 Relative curves between load and time during over reinforcement rate

基于对钢筋混凝土三点弯曲梁试件断裂试验现象的分析,钢筋混凝土三点弯曲梁试件的失稳荷载主要由试件内部的配筋率所决定,且经过最大荷载之后,承载力主要由钢筋所决定<sup>[16]</sup>。考虑到钢筋应力应变曲线的特点,加载后期,钢筋混凝土的荷载值和钢筋极限屈服应力之间不断在平衡与不平衡之间进行转换,当荷载值大于钢筋极限应力值时,荷载将会迅速降低一定数值,保证荷载值和钢筋极限应力维持在新的平衡上,然后逐步增加,之后再次出现荷载值大于钢筋极限屈服应力值的情况,一直循环下去。因此,图7中的声发射参数出现连续多次的峰值信号;相应地,图8中,钢筋混凝土三点弯曲梁试件的荷载值过了最大值之后,始终维持在钢筋极限屈服强度附近。

## 4 结 语

本文基于混凝土断裂试验过程中存在的异常现象,借助声发射实时动态无损检测技术,分析并解释了带预制裂缝混凝土三点弯曲梁试件断裂破坏过程中仅出现的一个峰值信号,以及钢筋混凝土三点弯曲梁声发射信号在失稳荷载附件循环增减的异常现象。该研究成果不仅解释了混凝土三点弯曲梁断裂试验过程中存在的异常现象,同时,还将声发射技术应用于混凝土损伤断裂试验中,为进一步研究混凝土损伤断裂提供了一种新的方法。

## 参 考 文 献:

- [1] NAVALURKAR R, HSU C T T. Fracture analysis of high strength concrete members [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, 13(3): 185-193.
- [2] RAGHU PRASAD B K, BHARATKUMAR B H, RAMACHANDRA MURTHY D S, et al. Fracture mechanics model for analysis of plain and reinforced high-performance concrete beams [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2005, 131(8): 831-838.
- [3] KUMAR S, BARAI S V. Determining the double- $K$  fracture parameters of concrete for compact tension and wedge splitting tests using weight function [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(5): 935-948.
- [4] FAN Xiang-qian, HU Shao-wei. Influence of crack initiation length upon fracture parameter of high strength reinforced concrete [J]. Applied Clay Science, 2013, 79(6): 25-29.
- [5] 潘家铮. 断裂力学在水工结构设计中的应用 [J]. 水利学报, 1980, 11(1): 45-59. (PAN Jia-zheng. Applications of fracture mechanics to the design of hydraulic structures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980, 11(1): 45-59. (in Chinese))

- [6] 吴智敏, 赵国藩. 混凝土断裂韧度的尺寸效应研究[J]. 工业建筑, 1995, 25(4): 20-22. (WU Zhi-min, ZHAO Guo-fan. Studies on size effect of fracture toughness of concrete[J]. Industrial Construction, 1995, 25(4): 20-22. (in Chinese))
- [7] 范向前, 胡少伟, 陆俊. 非标准混凝土三点弯曲梁双  $K$  断裂韧度试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(10): 152-157. (FAN Xiang-qian, HU Shao-wei, LU Jun. Experimental research on double- $K$  fracture toughness of non-standard three point bending concrete beam[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(10): 152-157. (in Chinese))
- [8] 范向前. 混凝土损伤断裂全过程试验研究及其力学行为表征[D]. 南京: 河海大学, 2013. (FAN Xiang-qian. Experimental studies and mechanical behavior characterization on damage and fracture overall process of concrete[D]. Nanjing: Hohai University, 2013. (in Chinese))
- [9] 纪洪广. 混凝土材料声发射性能研究与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004. (JI Hong-guang. Research and application on acoustic emission performance of concrete material[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [10] 吴胜兴, 张顺祥, 沈德建. 混凝土轴心受拉声发射 Kaiser 效应试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(4): 31-39. (WU Sheng-xing, ZHANG Shun-xiang, SHEN De-jian. An experimental study on Kaiser effect of acoustic emission in concrete under uniaxial tension loading[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(4): 31-39. (in Chinese))
- [11] SUZUKI T, OGATA H, TAKADA R, et al. Use of acoustic emission and X-ray computed tomography for damage evaluation of freeze-thawed concrete[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 2347-2352.
- [12] ALDAHDOOH M A A, BUNNORI N M, MEGAT JOHARI M A. Damage evaluation of reinforced concrete beams with varying thickness using the acoustic emission technique[J]. Construction and Building Materials, 2013, 44(2): 812-821.
- [13] 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): 17-20. (HU Shao-wei, LU Jun, FAN Xiang-qian. Study on acoustic emission technique for normal concrete fracture test [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6): 17-20. (in Chinese))
- [14] XU S L, REINHARDT H W. Determination of double- $K$  criterion for crack propagation in quasi-brittle materials, part II: analytical evaluating and practical measuring methods for three-point bending notched beams. International Journal of Fracture, 1999, 98(2): 151-177.
- [15] AGGELIS D G, SOULIOTI D V, SAPOURIDIS N, et al. Acoustic emission characterization of the fracture process in fibre reinforced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(7): 4126-4131.
- [16] SHAHIDAN S, PULIN R, MUHAMAD BUNNORI N, et al. Damage classification in reinforced concrete beam by acoustic emission signal analysis[J]. Construction and Building Materials, 2013, (45): 78-86.

## Experimental analysis of abnormal phenomena in concrete fracture process based on acoustic emission signals characterization

FAN Xiang-qian, HU Shao-wei, LU Jun

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** As a kind of artificial stone, the fracture failure process of concrete must have some randomness owing to impacts caused by concrete placement. Based on the acoustic emission dynamic nondestructive detecting technology, the objectivity of special test phenomenon has been analyzed for both the crack propagation with deviation of notched concrete three-point bending beam and the failure load reciprocating increase and decrease of the reinforced concrete three-point bending beam. It is found from the experimental results that the cracks propagate around the coarse aggregate rather than along the prefabricated crack because the coarse aggregate is just poured in the prefabricated crack tip. When the ratio of reinforcement is too high, the failure load of the reinforced concrete will vary near the yield strength of the bar cyclicly. It is thus clear that the instable load of the reinforced concrete three-point bending beam specimen would depend on the level of the ratio of concrete reinforcement bar. The research results indicate that the acoustic emission technology can be taken as a new research method for damage and fracture of concrete.

**Key words:** concrete; fracture process; acoustic emission; crack; cyclic loading