



钢筋混凝土断裂全过程声发射特征辨识及相关参量影响

范向前^{①②}, 胡少伟^{①②*}, 陆俊^{①②}

① 南京水利科学研究院, 南京 210029;

② 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098

* E-mail: hushaowei@nhri.cn

收稿日期: 2014-03-10; 接受日期: 2014-09-01

国家杰出青年科学基金(批准号: 51325904)、国家自然科学基金(批准号: 51279111, 51309163, 51409162)、江苏省自然科学基金(批准号: BK20140081)、中国博士后科学基金(批准号: 2014M551624)和江苏省博士后科研资助计划(编号: 1302055B)资助项目

摘要 以声发射参量为切入点, 通过开展带预制裂缝混凝土三点弯曲梁试件声发射试验, 采用振铃计数率-时间曲线、累计振铃计数-时间曲线、能量-时间曲线和累计能量-时间曲线等, 研究了不同设计强度等级和不同配筋率混凝土三点弯曲梁试件断裂破坏过程声发射参量基本特性. 研究表明: 通过振铃计数-时间曲线和能量-时间曲线相互结合, 可以更加准确地判断三点弯曲梁试件的起裂荷载和失稳荷载; 初始设计强度对混凝土和钢筋混凝土断裂过程声发射参量具有一定影响; 配筋率不同, 钢筋混凝土三点弯曲梁试件断裂破坏过程也不相同, 其对应的声发射信号也存在有一定差别. 为进一步研究混凝土三点弯曲梁断裂破坏过程提供了一定的试验依据.

关键词

混凝土
钢筋混凝土
强度等级
配筋率
断裂
声发射参量

1 引言

材料受外力或内力作用而产生变形或断裂时, 以弹性波形式释放出应变能的现象称为声发射^[1]. 声发射技术是借助电子技术、计算机技术以及信号处理手段将这一现象转化为人们可以利用和认识的信号, 据此来解释结构内部的缺陷变化、判断声发射源的位置以及所处的状态的技术^[2]. 目前, 由于声发射技术具有实时、动态、方便、覆盖面广等优点, 作为一种新型的无损检测技术正越来越多地受到人们的重视, 其切实有效性已得到证实, 在常规混凝土以及水工混凝土结构中得到应用, 并引起越来越多的关注^[3,4].

通过大量的实验研究发现, 同其他材料的声发射机理一样, 混凝土在受到外部或内部作用时会发生变形或断裂, 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声发射测试设备传感器时, 传感器表面晶体因此产生变形, 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. 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. 国内学者针对混凝土断裂过程声发射特性, 已开展了相关的研究. 纪洪广等人^[5]通过对声发射性能参数的特点、灵敏度及使用条

引用格式: 范向前, 胡少伟, 陆俊. 钢筋混凝土断裂全过程声发射特征辨识及相关参量影响. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 849–856
Fan X Q, Hu S W, Lu J. Acoustic emission characteristics identification and related parameters influence of reinforced concrete fracture process (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 849–856, doi: 10.1360/N092014-00056

件进行概括和分析, 提出了识别混凝土临界断裂的方法^[6], 并指出混凝土在高应力水平下声发射信号优势频率将逐渐升高^[7]. 吴胜兴等人^[8]指出幅度、振铃、持续时间、声发射信号能量、绝对能量、信号强度能较好地体现混凝土轴拉损伤过程的阶段性特征. 朱宏平等人^[9]运用测得的声发射特征参数对混凝土的损伤大小进行量化评估. Hu 等人^[10]在试验基础上, 基于声发射参量建立了混凝土三点弯曲梁损伤断裂本构关系; 同时, 针对声发射试验, 采用荷载-事件数, 荷载-撞击等试验曲线, 给出了混凝土断裂过程中起裂荷载的确定方法以及内部损伤二维和三维定位图^[11]等. 然而, 有关不同变量对混凝土断裂过程声发射特性影响的报道相对较少, 为此, 本文以强度等级和配筋率为参量, 开展普通混凝土和钢筋混凝土断裂过程声发射特性研究, 为《水工混凝土断裂试验规程》(DL/T 5332-2005)中确定三点弯曲梁试件的“起裂荷载”和“失稳荷载”提供一种新的试验方法, 并实时跟踪混凝土三点弯曲梁试件的开裂全过程. 研究表明: 不同强度等级和配筋率作用下, 混凝土和钢筋混凝土断裂过程声发射信号具有明显差别.

2 混凝土断裂声发射试验设计

由于三点弯曲试验的载荷作用点固定, 损伤破坏形成和发展的区域相对集中, 损伤模式和破坏机理均相对简单, 得到的声发射信号比较单纯, 是利用声发射技术研究材料损伤与断裂的首选加载方式^[12].

表 1 配合比

强度等级(MPa)	水泥	粉煤灰	矿渣粉	外加剂	水胶比(%)	砂	石	砂率(%)
C25/RC25	0.72	0.13	0.15	0.01	0.54	2.42	3.21	43
C60/RC60	0.84	0.08	0.08	0.018	0.31	1.03	1.94	35

因此, 本文选择长 1000 mm, 宽 120 mm, 高 200 mm 带预制裂缝的三点弯曲梁试件进行试验. 设计强度等级有 25 和 60 MPa 两种, 包括普通混凝土(C25, C60)和钢筋混凝土(RC25, RC60), 其中钢筋混凝土配置钢筋直径大小有 6 和 10 mm, 每组试件设计 4 个. 初始预制裂缝长度值设计为 80 mm, 即保证混凝土三点弯曲梁试件的初始缝高比为 0.4. 试验所用混凝土由南京普迪混凝土有限公司提供, 具体配合比如表 1 所示.

本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. 为了使声发射传感器接收更加优质的信号, 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, 在试件两侧布置 8 个传感器(括号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.

试验过程中, 除了测试三点弯曲梁试件 3 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. 试验过程中, 由于不可避免会出现噪声, 参考相关文献^[13], 本次声发射试验阈值设置为 40 dB, 滤波频率为 20~100 kHz. 试验加载装置如图 1 所示, 其中: F 为荷载值, h 为试件高度, t 为试件厚度, L 为试件长度, S 为 2 支座间的跨度, a_0 为初始

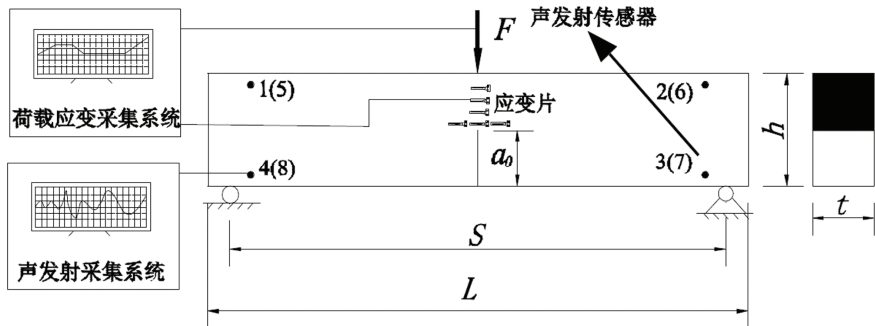


图 1 声发射试验装置图

裂缝长度。

3 不同强度等级混凝土断裂声发射参量的变化规律

根据声发射试验, 图 2 和 3 分别给出了强度等级为 25 和 60 MPa 两种强度等级混凝土三点弯曲梁试件振铃计数率-时间关系图和振铃计数-时间关系图。对比两图可知, 声发射振铃计数率曲线的两次突变可以准确地判断三点弯曲梁试件的起裂荷载与失稳荷载^[14]。进一步分析发现, 两种强度等级三点弯曲梁试件声发射信号大小相近, 但其变化规律存在一定差别。对于设计强度等级为 25 MPa 的混凝土三点弯曲梁试件, 振铃计数率除了在起裂时刻发生突变外, 在其破坏时刻附近均发生多次突跃。然而, 对于初始设计强度等级相对较高的 60 MPa 混凝土三点弯曲梁试件, 其振铃计数率仅在发生起裂和失稳破坏时刻出现相对单一的突变。相对于振铃计数率-时间变化曲线, 振铃计数-时间曲线从起裂到失稳破坏阶段, 60 MPa 高强混凝土三点弯曲梁试件振铃计数曲线变化趋势相对缓慢, 且在最终破坏时刻增幅较小, 而强度等级为 25 MPa 的混凝土三点弯曲梁试件, 从起裂时

刻开始, 振铃计数曲线上坡度较大, 且在临界失稳破坏时刻, 出现相对较大的增幅。分析原因, 高强混凝土(60 MPa)三点弯曲梁试件强度等级较高, 相对脆性较大, 当其承载能力达到极限屈服强度时, 将即刻发生破坏现象, 故其声发射信号主要发生在起裂和失稳破坏时刻。

对比振铃计数-时间曲线, 图 4 和 5 分别给出了 25 和 60 MPa 两种强度等级混凝土三点弯曲梁试件能量-时间曲线和累计能量-时间曲线。由图可知, 同振铃计数变化关系相类似, 通过能量-时间变化规律可以准确确定混凝土三点弯曲梁试件起裂荷载和失稳荷载, 同时借助累计能量-时间变化曲线可以判断试件的脆断性。能量突变时刻和振铃计数率突变时刻相对应, 两者确定的起裂和失稳时刻完全一致。结合振铃计数率-时间曲线和能量-时间曲线, 可以进一步加强混凝土三点弯曲梁试件起裂荷载、失稳荷载判断的精准度。

尽管通过混凝土三点弯曲梁试件声发射参数曲线的突变, 可以准确判断三点弯曲梁试件的起裂荷载和失稳荷载, 但是, 进一步分析发现, 除了起裂时刻和失稳时刻声发射参数发生突变外, 其他时刻也伴随有声发射信号突变的现象, 如图 4 所示。尽管这

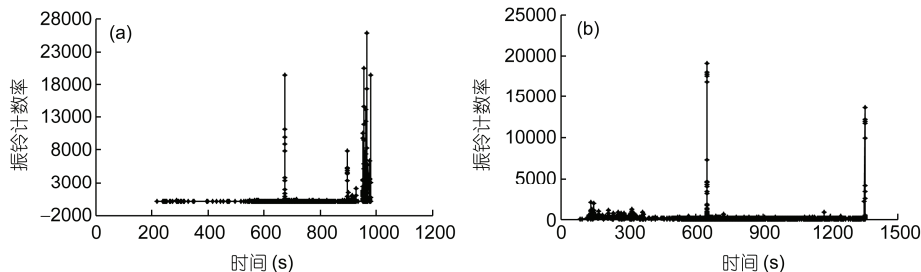


图 2 不同强度等级声发射振铃计数率与时间关系

(a) C25; (b) C60

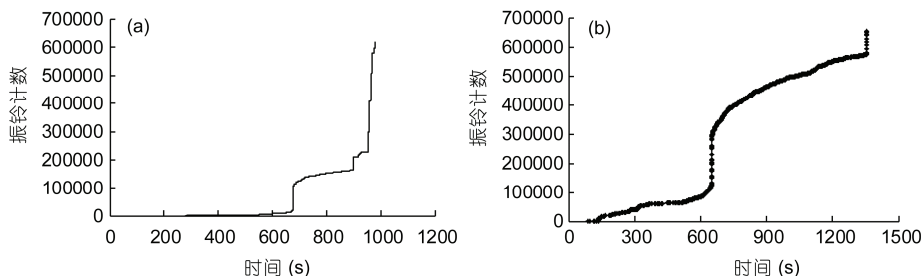


图 3 不同强度等级声发射振铃计数与时间关系

(a) C25; (b) C60

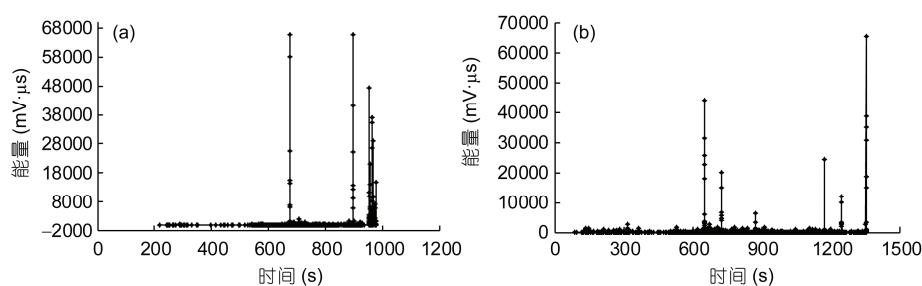


图4 不同强度等级声发射能量与时间关系

(a) C25; (b) C60

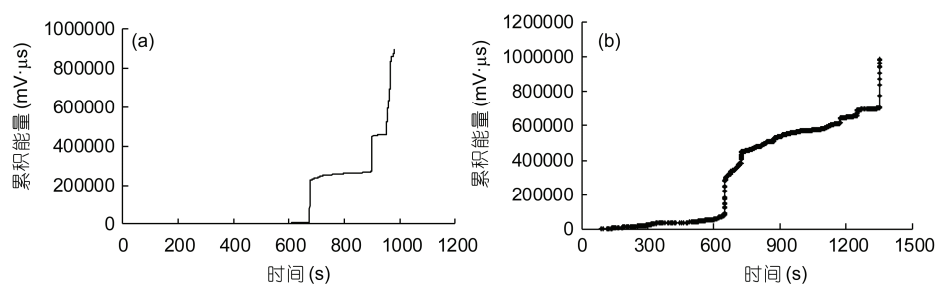


图5 不同强度等级声发射累计能量与时间关系

(a) C25; (b) C60

些信号的突变不影响起裂荷载和失稳荷载的判断, 但有必要对其进行分析研究. 由混凝土三点弯曲梁试件断裂试验现象可知, 试件从开始起裂到失稳破坏是一个断裂扩展过程, 即断裂过程区^[15], 由于断裂过程区的存在, 试件开裂之后, 混凝土骨料之间的黏聚力阻止裂缝的进一步开展, 从而, 主裂缝的扩展过程中, 在试件的薄弱位置会产生一定量的微裂缝, 这些微裂缝的产生和扩展不可避免地产生有声发射信号, 此刻, 声发射信号将发生一定的突变, 然而, 这些突变并不能改变主裂缝的扩展趋势.

4 不同强度等级钢筋混凝土断裂声发射参量的变化规律

图6和7分别给出了强度等级为25和60 MPa, 两种强度等级钢筋混凝土三点弯曲梁试件振铃计数率-时间曲线图和振铃计数-时间曲线图. 尽管钢筋的加入使混凝土损伤断裂破坏过程中产生的声发射信号明显增加, 但相对于60 MPa的高强钢筋混凝土三点弯曲梁试件, 强度等级为25 MPa时, 其声发射信号明显增多, 且更加杂乱. 进一步分析发现, 60 MPa高强钢筋混凝土三点弯曲梁试件振铃计数率曲线对

应的2个突变峰值更加明显, 即强度等级越高, 声发射信号确定的起裂荷载和失稳荷载越精确, 如图6(b)的2个峰值和图7(b)曲线的2个转折点. 分析原因, 由于25 MPa的钢筋混凝土三点弯曲梁试件, 其承载能力相对较低, 荷载的增加将会不断打破钢筋与混凝土之间的相互平衡力, 导致声发射信号多而杂, 而对于强度等级为60 MPa的高强钢筋混凝土三点弯曲梁试件, 不仅极限承载力较高, 且脆性较大, 尽管随着荷载的增加, 钢筋与混凝土之间的相互平衡力被打破时会产生声发射信号, 但相对其脆性开裂和破坏时的声发射信号要弱很多, 故高强钢筋混凝土三点弯曲梁试件起裂和失稳破坏时声发射峰值信号更加明显.

除了对比分析两种设计强度等级下, 钢筋混凝土三点弯曲梁试件振铃计数率-时间曲线和振铃计数-时间曲线外, 图8和9进一步给出了25, 60 MPa两种强度等级钢筋混凝土三点弯曲梁试件的能量-时间曲线图和累计能量-时间曲线图. 由图8和9可知, 能量-时间曲线图表现出和振铃-时间曲线图基本相似的变化规律, 60 MPa高强钢筋混凝土声发射能量信号相对较少, 且起裂和失稳破坏时所对应的2个声发射峰值信号也较为明显. 另外, 在前述的分析中提到, 由于25 MPa钢筋混凝土三点弯曲梁试件声发射信号

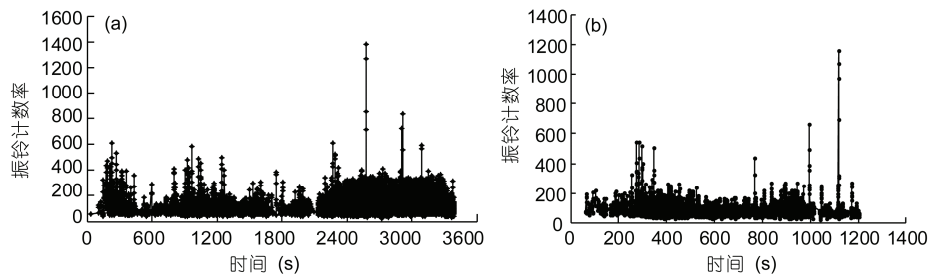


图 6 不同强度等级钢筋混凝土声发射振铃计数率与时间关系
(a) RC25; (b) RC60

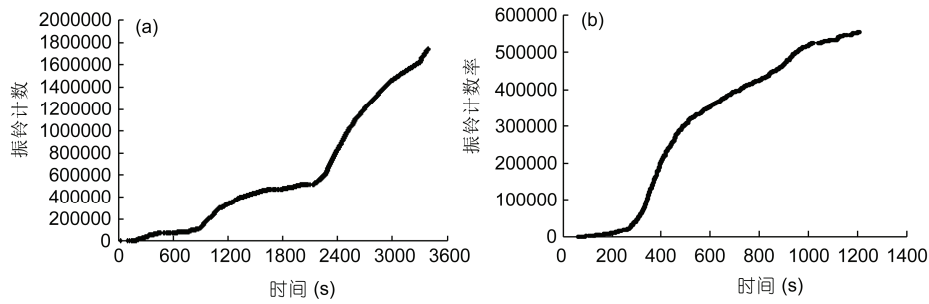


图 7 不同强度等级钢筋混凝土声发射振铃计数与时间关系
(a) RC25; (b) RC60

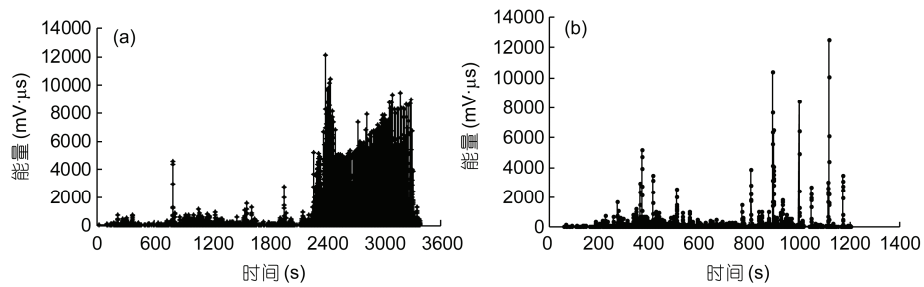


图 8 不同强度等级钢筋混凝土声发射能量与时间关系
(a) RC25; (b) RC60

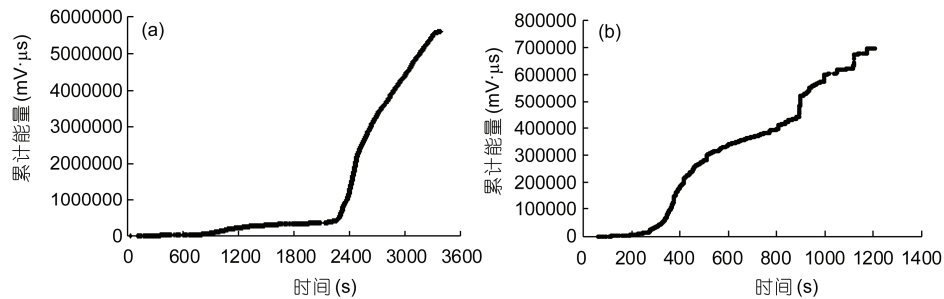


图 9 不同强度等级钢筋混凝土声发射累计能量与时间关系
(a) RC25; (b) RC60

较为杂乱, 两个峰值信号并不明显, 起裂荷载和失稳荷载的判断相对困难, 为此, 可以通过多个声发射信号关系曲线综合判断试件起裂和失稳时刻的峰值信号。例如, 可以通过图 6 中最大峰值来确定失稳时刻, 结合图 8 中的第一个声发射信号峰值来确定 25 MPa 钢筋混凝土试件的起裂时刻, 且图 6 和 8 之间形成互补, 尽管图 6 起裂时刻的峰值信号不明显, 但是对应图 8 的第 1 个峰值信号, 起裂时刻图 6 同样出现 1 个声发射峰值信号。

5 不同配筋率钢筋混凝土断裂声发射参量的变化规律

配筋率作为钢筋混凝土设计的主要因素, 对混

凝土三点弯曲梁试件断裂韧度的影响尤为明显^[16], 因此, 有必要重点探讨不同配筋率作用下钢筋混凝土三点弯曲梁试件声发射信号的变化规律。

图 10 和 11 分别给出了不同配筋率下, 钢筋混凝土三点弯曲梁试件声发射振铃计数率-时间曲线和振铃计数-时间曲线图。由图可知, 配筋率越大($\Phi=10$ mm), 钢筋混凝土声发射信号越多越杂乱。由于混凝土设计强度等级相同, 其基体混凝土结构脆断性相似, 当配置钢筋之后, 相同混凝土试件的配筋率越大, 其抵抗开裂破坏的能力则越强, 延性也相对越好。结合强度等级对钢筋混凝土声发射参数的影响规律可知: 脆性越大, 声发射信号参数越纯粹; 延性越大, 声发射信号参数就越多越杂乱。

图 12 和 13 进一步给出了不同配筋率下, 钢筋混

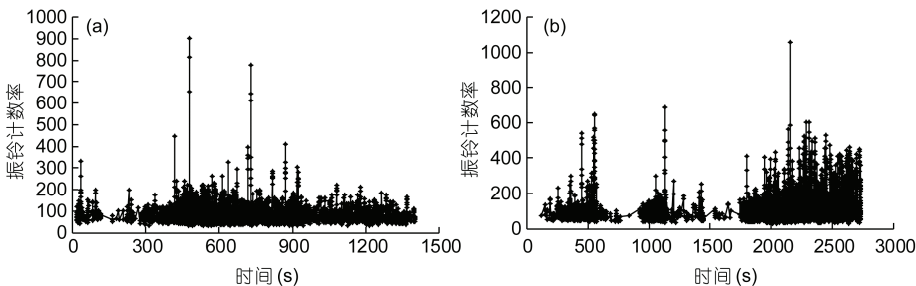


图 10 不同配筋率钢筋混凝土声发射振铃计数率与时间关系

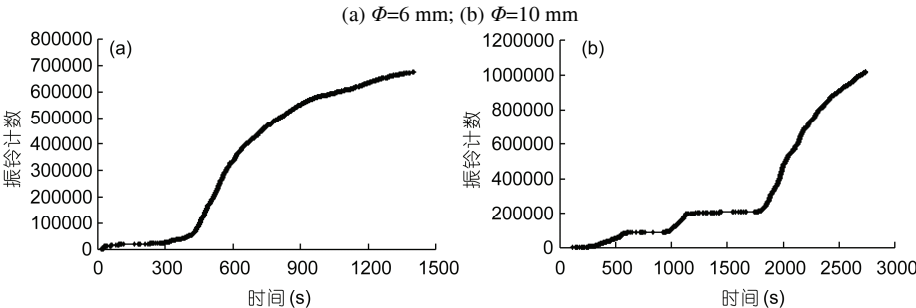


图 11 不同配筋率钢筋混凝土声发射振铃计数与时间关系

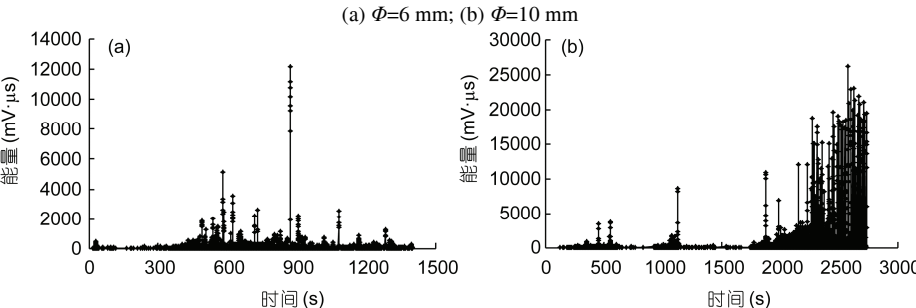


图 12 不同配筋率钢筋混凝土声发射能量与时间关系

(a) $\Phi=6$ mm; (b) $\Phi=10$ mm

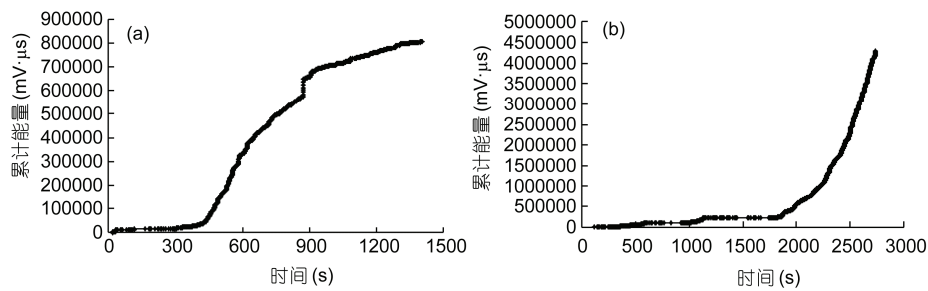


图 13 不同配筋率钢筋混凝土声发射累计能量与时间关系

(a) $\phi=6$ mm; (b) $\phi=10$ mm

凝土三点弯曲梁试件声发射能量-时间关系曲线和累计能量-时间关系曲线。能量时间曲线不仅再次证明配筋率越大, 声发射信号越多越杂的现象, 同时, 结合振铃时间曲线图, 可以更加准确地判断钢筋混凝土三点弯曲梁试件的起裂荷载与失稳荷载。

6 结论

通过不同变量混凝土和钢筋混凝土带缺口三点弯曲梁损伤断裂试验, 研究了其破坏全过程声发射信号基本特性, 给出了起裂荷载和最大荷载精确判断方法。

初始设计强度等级越高, 试件脆断性越明显, 声发射信号表述的混凝土和钢筋混凝土损伤断裂破坏过程越清晰。

配筋率对钢筋混凝土损伤断裂破坏过程声发射信号具有一定影响, 配筋率越大, 延性越好, 声发射信号越杂乱。

除本文开展的声发射信号特征定性描述混凝土和钢筋混凝土损伤断裂破坏过程外, 声发射参量定量表述混凝土和钢筋混凝土损伤断裂破坏过程有待进一步研究, 成果对于混凝土结构工程的安全评价具有重要意义。

参考文献

- 1 Bentahar M, Gouerjuma R E. Monitoring progressive damage in polymer based composite using nonlinear dynamics and acoustic emission. *J Acoust Soc Am*, 2009, 125: 39–44
- 2 Muralidhara S, Raghu B K, Hamid E, et al. Fracture process zone size and true fracture energy of concrete using acoustic emission. *Constr Build Mater*, 2010, 24: 479–486
- 3 Shiotani T, Bisschop J. Temporal and spatial development of drying shrinkage cracking in cement-based materials. *Eng Fract Mech*, 2003, 70: 1509–1525
- 4 Schechinger B, Vogel T. Acoustic emission for monitoring a reinforced concrete beam subject to four-point-bending. *Constr Build Mater*, 2007, 21: 483–90
- 5 纪洪广, 张天森, 张志勇, 等. 无损检测中常用声发射参数的分析与评价. *无损检测*, 2001, 23: 289–291
- 6 纪洪广, 王基才, 单晓云, 等. 混凝土材料声发射过程分形特征及其在断裂分析中的应用. *岩石力学与工程学报*, 2001, 20: 801–804
- 7 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. *应用声学*, 2011, 30: 112–117
- 8 吴胜兴, 王岩, 沈德建. 混凝土及其组成材料轴拉损伤过程声发射特性试验研究. *土木工程学报*, 2009, 42: 21–27
- 9 朱宏平, 徐文胜, 陈晓强, 等. 利用声发射信号与速率过程理论对混凝土损伤进行定量评估. *工程力学*, 2008, 25: 186–191
- 10 Hu S W, Lu J, Xiao F P. Evaluation on concrete fracture procedure based on acoustic emission parameters. *Constr Build Mater*, 2013, 47: 1249–1256
- 11 胡少伟, 陆俊, 范向前. 混凝土断裂试验中的声发射特性研究. *水利发电学报*, 2011, 30: 17–20
- 12 张璇子, 陈红迁, 王志勇. 混凝土材料三点弯曲破坏的声发射特性. *实验力学*, 2010, 25: 457–462
- 13 Aldahdooh M, Bunnori N M. Damage evaluation of reinforced concrete beams with varying thickness using the acoustic emission technique. *Constr Build Mater*, 2013, 44: 812–821
- 14 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. 博士学位论文. 南京: 河海大学, 2013
- 15 Guinea G V, Pastor J Y, Plans J, et al. Stress intensity factor, compliance and CMOD for a general three-point-bend beam. *Int J Fracture*, 1998, 89: 103–116

16 范向前, 胡少伟, 陆俊. 不同配筋率对钢筋混凝土三点弯曲梁断裂韧度的影响. 水电能源科学, 2013, 12: 117-121

Acoustic emission characteristics identification and related parameters influence of reinforced concrete fracture process

FAN XiangQian^{1,2}, HU ShaoWei^{1,2} & LU Jun^{1,2}

¹ Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

² State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China

Taking acoustic emission (AE) parameters as the cut-in point, AE experiments were carried out for three-point bending beams with notch, the basic features of AE parameters were studied for the fracture process of concrete and reinforced concrete with different strength grades and different reinforcement ratios, through ringing counts rate and time curve, accumulative ringing counts and time curve, energy and time curve, accumulate energy and time curve, et al. The research result shows that the initial loads and the maximum loads of concrete three-point bending beams can be determined more accurately, by the reciprocal combination of ringing counts and energy curves. The AE parameters of concrete and reinforced concrete three-point bending beams are influenced by the initial design strength. As the reinforcement ratio changes, the fracture processes of reinforced concrete are different, and the corresponding AE signals are also different. The results of this work will provide the experimental basis to further study the fracture process of concrete.

concrete, reinforced concrete, strength grade, reinforcement ratio, fracture, acoustic emission parameters

doi: 10.1360/N092014-00056