

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.01.009

变幅循环荷载下混凝土轴拉声发射特性试验

王岩¹, 王瑶², 路桂娟¹, 徐郑郑¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 金陵科技学院建筑工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 采用声发射技术对混凝土试件在变幅循环轴拉荷载作用下的损伤破坏过程所伴生的声发射信号进行采集, 分析混凝土的凯塞效应及典型声发射特性。结果表明: 声发射凯塞效应和费利希蒂效应过渡的加载阶段约有62%极限应力, 此临界点可作为混凝土轴拉裂缝发展稳定与否的标志; 声发射振铃数、声发射 ASL 平均值和声发射幅度均呈现出随着加载阶段的延续而增加的趋势。相关结果可以作为预测混凝土结构安全和损伤程度的依据。

关键词: 变幅循环; 混凝土; 轴拉; 声发射; 凯塞效应

中图分类号: TU528.07

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2014)01-0045-05

Experimental study on acoustic emission characteristics of concrete under variable amplitude cyclic tension loading

WANG Yan¹, WANG Yao², LU Guijuan¹, XU Zhengzheng¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: Acoustic emission (AE) signals associated with the damage processes of concrete specimens under variable amplitude cyclic tension loading were obtained using acoustic emission techniques. The Kaiser effect and typical AE characteristics of the concrete damage processes were analyzed. The results show that the conversion loading stage between the Kaiser effect and Felicity effect was at 62% ultimate stress; this critical point can be used as a sign of a critical state for concrete micro-cracks under uniaxial tension during the stable or unstable development. The AE count number, the average ASL voltage, and the AE amplitude all showed an increasing trend with the extension of the loading stage. The research results can provide a basis for prediction of the structural safety and damage degree of concrete.

Key words: variable amplitude cyclic; concrete; uniaxial tension; acoustic emission; Kaiser effect

近年来全球地震、台风等自然灾害频发, 研究变幅循环荷载下混凝土损伤过程的基本特征和机理对混凝土结构的抗震安全评估和防倒塌设计具有重要意义。由于混凝土抗拉强度低而容易开裂, 进而影响结构性能和耐久性^[1-2], 因此, 研究混凝土受拉损伤破坏过程的机理就显得很重要。当混凝土材料受力学荷载或其他作用产生变形或开裂时, 以弹性波形式释放出瞬时应变能的现象称为声发射(AE), 用仪器探测、记录、分析声发射信号和利用声发射信号推断声发射源的技术称为声发射技术。该技术对于实时动态地获得材料内部开裂信息和研究损伤过程是一种有效的方法^[3-4], 其技术特点体现为探测材料变形和开裂等微观活动的高灵敏性^[5]和实时性^[6]。笔者采用声发射技术对混凝土试件在变幅循环轴拉荷载作用下的损伤破坏过程所伴生的声发射信号进行采集, 通过分析变幅循环轴拉荷载作用下混凝土损伤过程的声发射信号, 分析凯塞(Kaiser)效应及典型声发射特性, 找出适用于表征变幅循环加载损伤过程的声发射特征参数及其变化规律, 并对其损伤机理进行分析。

收稿日期: 2013-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(51009058); 中国博士后科学基金(2011M501160)

作者简介: 王岩(1980—), 男, 黑龙江双鸭山人, 副教授, 博士, 主要从事混凝土声发射特性研究。E-mail: hhuwy@126.com

1 试验装置与试验设计

1.1 试件制备

所采用的混凝土配合比如下:水 230 kg/m³,水泥 418 kg/m³,砂 651 kg/m³,石子 1 019 kg/m³,水灰比(质量比)0.55,坍落度 190 mm。为了得到圆柱体混凝土轴拉试件,首先在钢模中浇筑混凝土,在 28 d 混凝土凝结硬化之后采用混凝土取芯机钻取直径为 100 mm 的圆柱体混凝土芯样,采用混凝土切割机切除两端的浮浆层得到高度为 260 mm 的无缺口混凝土圆柱体试件,然后在试件两端采用环氧树脂结构胶粘贴传递轴向拉力的传力钢板,得到最终的轴拉试件。

1.2 加载方案

为了采用声发射监测系统采集混凝土试件轴拉损伤破坏过程所伴生的声发射信号,设计循环变幅三角波加载方案如下:每个循环按力控制加载,加载速度取 0.03 MPa/s,每个三角波的循环依次递增 10% 极限荷载(0.3 MPa),直至 2.7 MPa,改为按位移控制加载直至破坏,位移控制加载速度为 0.025 mm/s。相应的加载过程如图 1 所示(图中 1~8 为加载序号)。

1.3 声发射信号采集系统

采用美国物理声学公司(PAC)生产的 SAMOSTM 声发射采集系统采集和存储声发射信号,采集控制软件为 AEwinTM。前置放大器(型号 PAC-2/4/6)带宽为 0.01~2.0 MHz,设置其增益为 40 dB。布置 4 支直径为 22 mm、型号为 R6α 的谐振式声发射传感器于混凝土试件中部,利用耦合剂(凡士林)通过橡胶带将其固定于试件表面。通过现场加载设备及周围环境噪音水平测定,设置系统阈值为 35 dB,其他相关参数的设置方案见文献[7]。试验系统如图 2 所示。

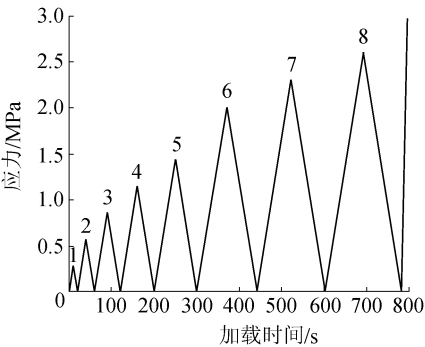


图 1 变幅循环加载时程曲线示意图

Fig. 1 Schematic diagram of time-history curve of variable amplitude cyclic loading

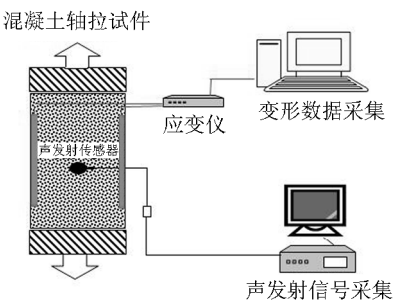


图 2 混凝土轴拉声发射监测系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of acoustic emission monitoring system of concrete under uniaxial tension

2 力学特性与破坏形态

各混凝土试件的抗拉强度以及在轴拉损伤破坏过程中接收到的声发射撞击总数如表 1 所示。本文所进行的 3 个混凝土试件的轴心抗拉强度在 2.0~3.0 MPa 之间,平均抗拉强度约为 2.45 MPa,数据略显离散,这与混凝土材料本身的性质有关。在加载过程中声发射采集系统所采集到的声发射撞击数(Hit 总数)平均约为 717 次。由于所采用的混凝土轴拉试件为无缺口的形式,因此整个受力损伤破坏过程更接近于实际工程的受力情况,裂缝从混凝土试件最薄弱的部位产生并发展,裂缝的位置也是随机出现的^[8]。

3 混凝土轴拉损伤声发射凯塞效应分析

凯塞效应是指材料在受载过程中声发射活动所具有的不可逆性,材料科学中将凯塞效应定义为当材料

表 1 混凝土试件力学特性和声发射特性参数

Table 1 Mechanical properties and acoustic emission characteristics of concrete specimens			
试件编号	加载时间/s	抗拉强度/MPa	Hit 总数/次
C08	796.0	2.97	862
C09	682.2	2.33	597
C10	372.8	2.06	693

所受荷载在没有到达其曾经历过的最大荷载水平前几乎不产生声发射,而一旦超过最大荷载水平时声发射活动便再度出现的现象^[9]。文献[10]试验结果表明,凯塞效应并不总是存在于整个加载阶段,而会在一定的应力水平失效,这种现象被称作费利希蒂(Felicity)效应^[11]。混凝土轴拉损伤过程声发射撞击累计数和振铃数与加载时程曲线的变化规律如图 3 所示。图 3(a)中的平台部分代表在加载期间没有声发射活动被探测到,在每个加载循环开始卸载到 0,直到再加载到未超过先前所受最大荷载之前也没有探测到显著的声发射活动,也就是说,在多数循环三角波的范围之内存在明显的凯塞效应。这一现象在图 3(b)中也可以被清晰地发现。

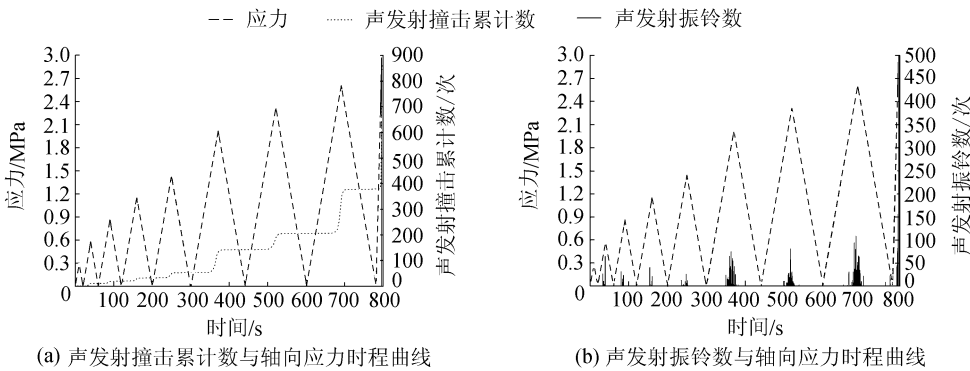


图 3 C08 试件混凝土在轴拉破坏过程中的凯塞效应示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Kaiser effect in concrete specimen C08 under uniaxial tension loading

为了更精确地定量分析三组混凝土试件在轴拉荷载作用下的凯塞效应,引入费利希蒂比 $F_{FR}=F_2/F_1$ 量化这一效应,其中 F_1 为预加载荷载值, F_2 为下一循环中出现显著声发射活动时对应的荷载值。混凝土试件各加载循环的费利希蒂比如表 2 所示,混凝土试件费利希蒂比随加载循环序号(损伤阶段)的变化曲线如图 4 所示。

表 2 C08 混凝土试件各加载循环的费利希蒂比

Table 2 Felicity ratio in each loading cycle of concrete specimen C08

试件 编号	抗拉强度/ MPa	费利希蒂比							
		$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$	$n=8$	$n=9$
C08	2.97	1.1	1.1	1.10	0.89	0.98	0.84	0.8	0.486
C09	2.33	1.6	1.2	1.14	0.96	0.82	0.90		
C10	2.06	1.0	1.0	0.95	0.92	0.79			

注: n 为加载循环序号。

可以看出,随着应力水平的不断提高,费利希蒂比大致呈现下降的趋势,也就是说,在应力水平比较高的加载循环中,下一循环未加载达到先期加载历史的最大应力时就已经出现了可以采集到的声发射信号,说明费利希蒂效应越来越明显,而凯塞效应逐渐衰退。可以将费利希蒂比开始小于 1.0 作为混凝土微裂缝开始不稳定扩展的临界状态(也就是凯塞效应开始衰退)的标志。由于混凝土试件个体材料性质(强度、均质度等)的差异,3 个混凝土试件费利希蒂比开始小于 1 时所对应的加载循环略有不同。这一现象与文献[11-12]所述结论基本相同。

凯塞效应可以从混凝土损伤发展的角度进行分析,当荷载施加于已承受过一定轴向应力作用的混凝土时,会导致混凝土中部分薄弱部位损伤开裂,相应部位所累积的应力被释放,但由于混凝土的开裂是不可逆的,亦即裂缝不会自行“愈合”,因此在未超过最大载荷历史内微裂缝不会再发生,也就不会探测到声发射活动;只有

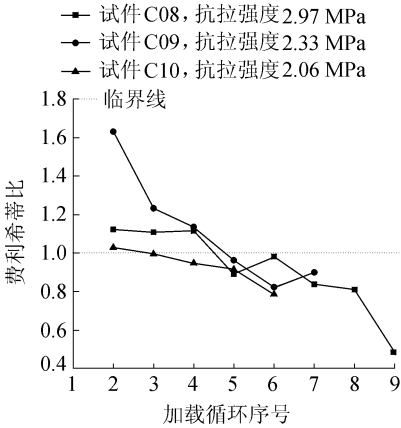


图 4 混凝土试件费利希蒂比随加载循环序号的变化

Fig. 4 Felicity ratio vs. loading cyclic number for concrete specimens

施加的载荷超过历史水平时才有完好混凝土发生新的损伤开裂,声发射活动才能再次产生并被声发射采集系统探测到。从这个角度而言,声发射活动反映了混凝土内部拉裂裂缝的损伤状况,声发射凯塞效应实质是对材料承受荷载产生损伤的一种表征,凯塞效应反映混凝土损伤状况的变化,即可记忆混凝土先前的损伤程度。从这一过程中也可以看出,声发射活动与混凝土内部微裂缝产生和发展之间存在良好的对应关系。

4 混凝土轴拉损伤声发射特性与力学特性之间的关系

4.1 声发射特性与轴拉强度之间的关系

各加载循环所接收到的声发射撞击总数占总撞击数的比例随加载阶段的变化如图 5 所示,可以看出,同样加载情况下,与试件 C08 和 C09 相比,试件 C10 的强度偏低,在声发射特性上的表现为,在前几个循环中,出现的声发射撞击数更多,这表明在试件 C10 之内,在低应力水平下就能够活化的缺陷数量要多于强度相对较高的 C08 和 C09 试件。由此可见,抗拉强度较低的混凝土试件在整个轴拉损伤破坏过程中的特征可以概括为,在较低的应力水平下就可以出现活化的缺陷活动。由此还可以发现,3 条曲线均在第 5 个循环时声发射振铃数显著突变,对比图 4 可知,第 5 个循环之后费利希蒂比也呈现出开始显著下降的趋势,这与混凝土轴拉损伤过程后期的微裂缝不稳定扩展有关。

4.2 声发射特性与损伤程度之间的关系

图 5 为各加载循环内声发射信号总数的变化趋势,进一步将各加载循环内接收到的声发射特征参数统计分析后,发现声发射振铃数、ASL 电压值和幅度均呈现出随着加载阶段的延续而波动增加的趋势,各加载循环内的声发射振铃数平均值和声发射 ASL 电压平均值的变化规律如图 6 和图 7 所示。可以看出:随着加载过程的延续,虽然每个加载循环的荷载增量是相同的,但是由此所诱发的声发射活动总量和平均活动强度均随着加载过程的延续而增加,也就是说以声发射振铃数、ASL 电压值和幅度为代表的声发射特性与损伤程度之间存在良好的对应关系。

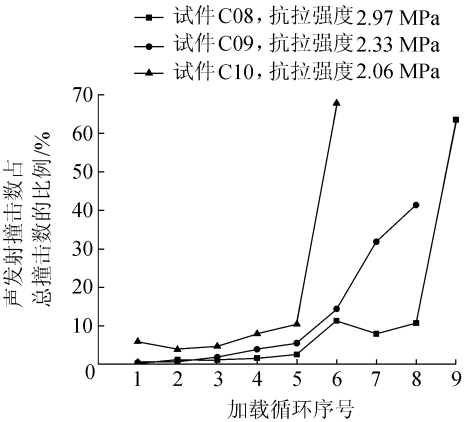


图 5 各加载循环所接收到声发射撞击数占总撞击数的比例随加载阶段的变化曲线
Fig. 5 Proportion of acoustic emission hit in each loading cycle to total hit vs. loading stage

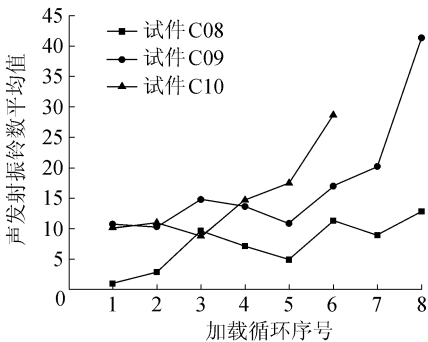


图 6 各加载循环内的声发射振铃数平均值
Fig. 6 Average value of acoustic emission count in each loading cycle

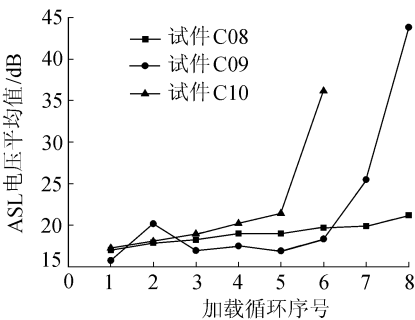


图 7 各加载循环内的声发射 ASL 电压平均值
Fig. 7 Average value of ASL in each loading cycle

5 结 语

基于混凝土试件在变幅循环轴拉荷载作用下的损伤破坏过程进行声发射监测和分析,通过研究变幅循环荷载作用下混凝土的凯塞效应及典型声发射特性,找出适用于表征变幅循环加载损伤过程的声发射特征参数及其变化规律,并对其损伤机理进行分析。所得结论如下:

- a. 声发射凯塞效应和费利希蒂效应的转折点(费利希蒂比等于 1.0)可作为混凝土轴拉裂缝发展稳定与否的标志。声发射可在费利希蒂比大于 1.0 阶段(也就是凯塞效应有效的范围之内)跟踪微裂缝的产生

和发展过程。

b. 相对于抗拉强度较高的混凝土试件,抗拉强度较低的混凝土试件在较低的应力水平下就可以出现活化的声发射活动,依此可以作为判断混凝土强度高低的依据。

c. 混凝土轴拉强度也呈现出与整个加载过程中声发射撞击累计数相关的特征。随着混凝土试件损伤程度的加剧,声发射信号的数量以及声发射信号的平均强度都呈现增加的趋势,其中声发射 ASL 电压值、声发射振铃数和声发射幅度能够更好地刻画损伤的演化和发展过程,也就是在混凝土轴拉微裂缝的不稳定发展阶段,呈现出声发射信号数量增多、量值增大的趋势,这些信息可以作为预测结构安全和损伤程度的依据。

参考文献:

[1] 杨卫忠,王博. 混凝土受拉随机损伤本构关系及其应用[J]. 工业建筑, 2004, 34(10): 50-52, 43. (YANG Weizhong, WANG Bo. A stochastic damage constitutional model and its application touniaxial tensile behavior of concrete[J]. Industrial Construction, 2004, 34(10): 50-52, 43. (in Chinese))

[2] 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[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 21-27. (WU Shengxing, WANG Yan, SHENG Dejian. Experimental study on acoustic emission characteristics of the damage process of concrete and its components under uniaxial tension [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7): 21-27. (in Chinese))

[3] GROSSE C, REINHARDT H W, DAHM T. Localization and classification of fracture types in concrete with quantitative acoustic emission measurement techniques[J]. NDT & E International, 1997, 30(4): 223-230.

[4] GROSSE C U, FINCK F. Quantitative evaluation of fracture processes in concrete using signal-based acoustic emission techniques[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(4): 330-336.

[5] WENG C C, TAM M T, LIN G C. Acoustic emission characteristics of mortar under compression[J]. Cement and Concrete Research, 1992, 22(4): 641-652.

[6] OHTSU M, OKAMOTO T, YUYAMA S. Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms concrete[J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(2): 87-95.

[7] 吴胜兴,王岩,李佳,等. 混凝土静态轴拉声发射试验相关参数研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 196-204. (WU Shengxing, WANG Yan, LI Jia, et al. Parameters of acoustic emission test of concrete under static uniaxial tension[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(5): 196-204. (in Chinese))

[8] 王岩,王瑶,姚金鑫,等. 混凝土轴拉损伤过程声发射特性研究进展[J]. 水利水电技术, 2012, 43(12): 34-97. (WANG Yan, WANG Yao, YAO Jinxin, et al. Overview of acoustic emission characteristics of concrete under uniaxial tension [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(12): 34-97. (in Chinese))

[9] 孙吉主,周健,唐春安. 影响岩石声发射的几个因素[J]. 地壳形变与地震, 1997, 17(3): 1-5. (SUN Jizhu, ZHOU Jian, TANG Chun'an. Factors affecting acoustic emission of rock[J]. Crustal Deformation and Earthquake, 1997, 17(3): 1-5. (in Chinese))

[10] LI C, NODRLUND E. Experimental verification of the Kaiser effect in rocks[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1993, 26(3): 333-351.

[11] 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 Shengxing, ZHANG Shunxiang, SHEN Dejian. 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))

[12] 赵兴东,李元辉,袁瑞甫,等. 花岗岩 Kaiser 效应的实验验证与分析[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2007, 28(2): 254-257. (ZHAO Xingdong, LI Yuanhui, YUAN Ruifu, et al. Experimental verification/analysis of Kaiser effect in granite[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2007, 28(2): 254-257. (in Chinese))