

文章编号:1671-251X(2016)10-0074-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2016.10.017

汪皓,王笑然,刘晓斐,等. 受载混凝土内部应变及声发射特征研究[J]. 工矿自动化,2016,42(10):74-78.

受载混凝土内部应变及声发射特征研究

汪皓, 王笑然, 刘晓斐, 李学龙, 湛堂啟

(中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要:为了研究混凝土试样破裂失稳过程中内部裂隙演化规律,对预埋应变砖的混凝土试样进行单轴压缩实验,研究了混凝土试样内部应变随时间的变化规律,测试并分析了试样受载破裂演化过程中的声发射信号特征,得出结论:在压密阶段,混凝土不同方向的应变变量均较小,声发射计数较低;在裂隙稳定扩展阶段,试样内部应变稳定增加,不同方向的局部应变变量有明显不同,声发射信号也呈现稳定增长趋势;当混凝土出现局部快速破裂时,会出现应变的突增及声发射信号激增;在临界失稳前,局部变形量快速增加,声发射信号也急剧增加;试样破裂时,各个方向的局部应变变量及声发射脉冲数均达到峰值。

关键词:混凝土; 裂隙演化; 内部应变; 声发射

中图分类号:TD311

文献标志码:A

网络出版时间:

网络出版地址:

Study on internal strain and acoustic emission characteristics of loaded concrete

WANG Hao, WANG Xiaoran, LIU Xiaofei, LI Xuelong, ZHAN Tangqi

(School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract:In order to study interior crack evolution rules in rupture and instability process of concrete specimen, uniaxial compression experiment of concrete specimen embedded with strain brick was conducted, variation rule of internal strain of the concrete specimen with time was studied, and acoustic emission signal characteristics of the samples in the evolution process of loading and fracture were measured and analyzed. The following conclusions are obtained: in the compaction stage, variables in different directions are small and acoustic emission count is low; in the stable crack propagation stage, the internal strain of samples increase stably, local strains in different directions are significantly different and acoustic emission signals also show a steady growth trend; when local fast rupture of concrete appears, strain and acoustic emission signal both increase suddenly; before the critical instability, local deformation increases rapidly and the acoustic emission signals increase dramatically; when fracture appears, local strains and acoustic emission pulse number in all directions reaches the peak.

Key words:concrete; crack evolution; internal strain; acoustic emission

0 引言

随着中国经济飞速发展,各类基础设施建设逐年递增,对混凝土材料的消耗巨大,每年因混凝土工

程在受载条件下出现失稳造成的事故时有发生。因此,有效地监测监控混凝土在受载条件下的安全状况具有重要意义。混凝土在载荷作用下,由于晶体间出现滑移,使得内部结构最先开始破裂失稳,由内

收稿日期:2016-03-09;修回日期:2016-08-22;责任编辑:胡娴。

基金项目:国家自然科学基金项目(51574231);教育部科学技术研究项目(113031A);中国矿业大学第七批优秀创新团队建设项目(2014ZY001)。

作者简介:汪皓(1990—),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要研究方向为煤岩动力灾害预防,E-mail:544326759@qq.com。通信作者:刘晓斐(1981—),男,山西晋中人,副教授,博士,主要从事煤矿动力灾害预防、安全技术及工程等方面的研究工作,E-mail:Liuxiaofei_1981@163.com。

部的微小位移变形逐步形成裂纹裂隙,并扩展延伸到整个混凝土中,最后发展成为宏观破裂,导致灾害的发生。因此,研究混凝土内部的裂隙在外部载荷作用下的变化规律具有重要的实践意义。很多学者对混凝土的裂隙演化规律进行了深入研究:赖于树等^[1]研究了在单向载荷作用下混凝土受载实验全过程变化规律,可以反映混凝土的失稳情况;谢和平^[2]对混凝土的损伤机理、强度及损伤断裂做了较为系统的描述;胡少伟等^[3]针对混凝土试样的断裂进行了混凝土内部裂隙发展的研究。但针对混凝土试样的研究大多集中于表面应变、裂隙的发展演化规律,很少对试样内部裂隙的发展和应变的实时动态变化进行细致的研究。本文借鉴参考文献[4-5],提出采用预埋应变砖法来研究载荷作用下试样内部应变的动态演化规律。

声发射(Acoustic Emission, AE)是当材料受外力或内力作用产生变形或断裂,以弹性波的形式向外释放应变能量的物理现象^[6]。自20世纪50年代金属材料声发射的Kaiser效应被发现以来,声发射技术逐步被用于材料特性研究。Lavrov A^[7]利用声发射技术和Kaiser效应对混凝土损伤破坏过程进行了定性和定量描述;孙强等^[8]通过对砂岩声发射信息的时间特性分析,研究了整个实验过程中的声发射信息规律;纪洪广等^[9]对混凝土材料损伤的声发射进行了动态检测试验研究;张茹等^[10]研究了峰值应力前声发射的平静期现象,并对其成因进行了解释;董毓利等^[11]分析了混凝土受压全过程声发射特性,构建了其损伤本构模型;纪洪广^[12]研究了混凝土材料声发射与应力—应变参量耦合关系,定量描述了混凝土的损伤过程。

对载荷作用下混凝土或煤岩体内部应变演化的研究大多停留在理论阶段,实验研究方面相对不足,基于此,本文通过预埋应变砖法对混凝土模型材料在单轴压缩条件下内部的应变及其声发射演化特征进行了实时、动态的监测,描述了其内部的应变实时变化,从而揭示了其内部裂隙演化规律。

1 实验系统与试样制作

1.1 实验系统

受载混凝土声发射响应和裂隙演化实验系统主要由加载系统、应变采集系统、声发射数据采集系统组成,如图1所示。加载系统采用微机控制电液伺服压力试验机,实验采用力控加载方式,加载速率为500 N/s。声发射信号的采集系统为24通道PCI-8

(AEwin Rock Test for Express-8)型声发射数据采集系统。应变采集系统由应变片、USB8516便携式数据采集仪、DSG9803应变放大器和DasView 2.0软件组成,能实现应变的实时动态采集。

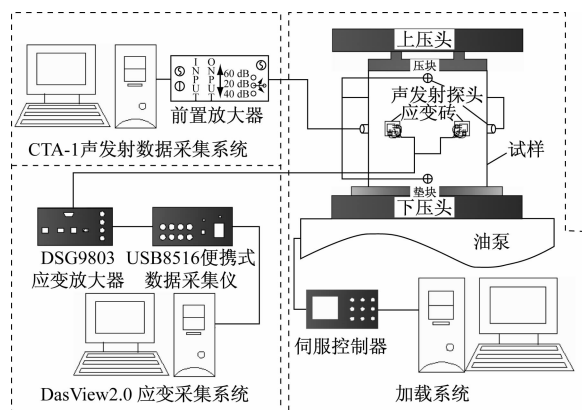


图1 实验系统

1.2 试样制作

为了降低实验误差,应变砖和混凝土选用相同配比进行制作。应变砖的制作应在混凝土试样制作前1~2周内完成,以使其有足够的时间凝固。用502胶把应变花和端子粘到混凝土块的中部,然后用万用表检查应变花是否短路,用小功率的电焊把应变花引线焊接到端子上,焊接过程中要避免虚焊点的存在。应变砖如图2所示。

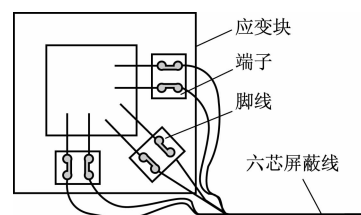


图2 预制应变砖

将应变砖埋在试样中间高度的平面上,在距其正中心左右37.5 mm各埋设一个应变砖,应变砖的布置如图3(a)、(b)所示。其中一个应变砖贴应变片的面与加载方向垂直,如图3(c)所示,用来测量压应变;另一个应变砖贴应变片的面与加载方向平行,如图3(d)所示,用来测量剪应变。应变花布置如图3(e)所示。

2 受载混凝土内部应变演化规律

为了减少环境因素的干扰,另接一个电阻应变片作为补偿。应变放大器的放大倍数为100倍,电阻应变片的灵敏系数 $K=2.08$,惠斯顿电桥电路的恒定电压 E 为2 V。实验开始前,将应变放大器所接通道全部归零。根据惠斯特电桥电路可得应变 ϵ 与输出电压 ΔU 的关系为

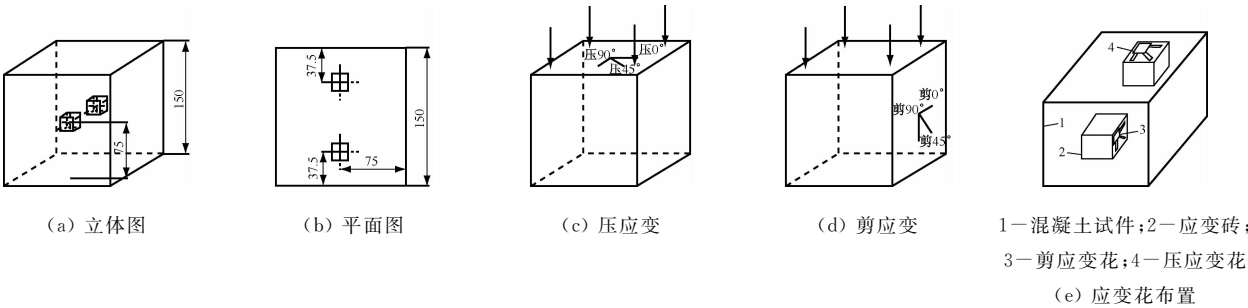


图 3 应变砖埋设布置

$$\epsilon = 9.615\ 4 \times 10^{-3} \Delta U \quad (1)$$

由式(1)可知,输出电压值为 1 V 时,对应产生的应变值为 $9.615\ 4 \times 10^{-3}$ 。试样加载过程中内部

应变随时间的动态变化过程如图 4 所示。图中应变值的正负代表应变片长度的变化,正表示应变片变短,负则表示应变片变长。

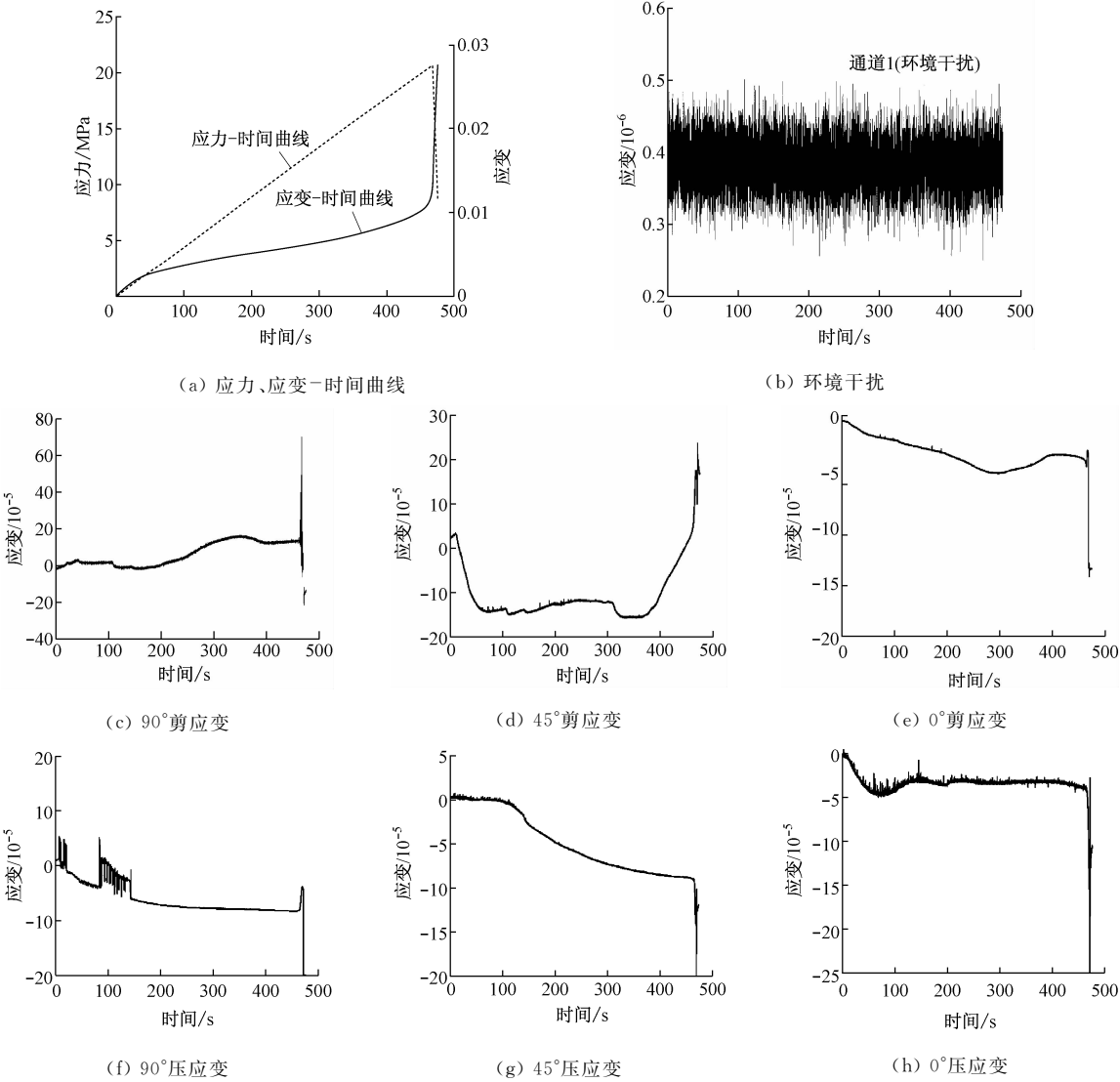


图 4 混凝土试样内部应变随时间动态变化曲线

图 4(a)为试样的轴向应力、应变随时间的变化曲线。轴向应变随时间变化可大致分为 3 个阶段:压密阶段,应变快速升高;线弹性阶段,应变缓慢升

高;破坏阶段,应变瞬间升高。图 4(b)为环境变化引起的应变,大约在 0.4×10^{-6} 上下波动,与加载过程中引起的应变相比非常小,可以忽略不计。

图4(c)、(d)、(e)分别为剪 90° 、剪 45° 、剪 0° 测出来的应变,由图3(d)可知,剪 90° 测出来的总应变应该和压机测出来的轴向应变相差不大。粗略计算可以发现,图4(c)中的曲线与横轴围成的面积与压机测得的总应变相差不大,这表明内部应变花测出的应变可以真实反映试样加载过程中内部的应变。剪 90° 应变片测量的是试样内部某点处的轴向微应变,故在整个过程中测出的应变几乎都为正值,剪 45° 应变片测量值先为正值,后变成负值,到加载后期又变成正值,而剪 0° 应变片在整个加载过程中都为负值,表明试样在横向扩大。

图4(f)、(g)、(h)分别为压 90° 、压 45° 、压 0° 测出来的应变,在整个加载过程中,图3(c)中的受压面向外扩增,故这3个应变片除在加载初期有正负波动外,其余加载过程测出的应变都为负值。剪 0° 、压 90° 、压 0° 测出的应变相差很小,非常接近,这是因为这几个应变片测得的都是试样向外扩增应变。

3 不同加载阶段内部应变及声发射演化规律

3.1 不同阶段应变演化规律

根据试样内部的裂隙演化规律,将试样整个实验过程分为3个阶段^[13]:压密阶段,稳定扩展阶段,失稳破坏阶段。

在加载初期(0~50 s),试样处于压密阶段,试样内部的微孔隙被压实,虽试样的整体应变变化较大(图4(a)中初期应变快速升高段),各个方向应变片测得的应变普遍较小,说明这几处应变砖在混凝土试样中埋放效果较好,应变砖表面和试样完全接触,中间没有微孔隙、气泡等。剪 90° 应变少量增加,说明混凝土试样在垂直于载荷方向上的微裂隙被压密,但由于载荷较小,轴向应变仍然基本为零;剪 0° 、压 90° 、压 0° 应变量增加,说明此阶段混凝土试样由于弹性变形而有轻微的膨胀现象,挤压平行于载荷方向上的微裂隙,且压密程度要大于垂直于载荷方向上的微裂隙压密程度,从而使剪 45° 应变明显大于压 45° 。

当加载到50~100 s时,试样内部裂纹开始进入稳定扩展阶段,试样内部开始起裂,新生微裂纹逐渐生成,并不断扩展、延伸,出现典型的耗时现象^[14]。剪 45° 、剪 0° 、压 90° 和压 0° 的实时应变都呈现出逐渐增大的趋势,这是由于轴向载荷逐渐增大,这些方向的应变片受力逐渐增大所致,而在这个过程中,剪 90° 和压 45° 应变几乎保持为零,说明这2处

的应变片还没开始受力。在100~150 s时,压 90° 和压 0° 两处的应变波动较大,说明在该阶段这2处的破裂较多。随着加载继续进行,直到峰值应力之前(450 s),除压 45° 应变片外,其他各处应变片测量的实时应变基本稳定,试样的整体变形较为均匀。

随着加载进一步进行,在峰值应力附近处,试样产生宏观裂纹,破裂失稳,在瞬间产生非常大的变形,此时各个方向的应变都产生突变,变化波动大,有的甚至超出量程。

在整个加载过程中,选取11个时间点,前10个时间点之间以50 s为间隔,最后一个时间点在475 s处,然后画出2个直角应变花上6个应变片的应变-时间散点图,如图5所示。从图5可看出,平行于载荷方向的直角应变花上所测应变量大于垂直于载荷方向上直角应变花所测应变量,这个结果和大多数的理论和实验相符。在0~200 s,剪 90° 应变基本为零,其他方向上的应变与之相比,都有明显的增大,而总的应变量也增加,说明这个时段内,混凝土实验内部裂纹的变化基本没有沿着剪 90° 方向。200 s以后,剪 90° 应变急剧增加,到350 s以后平稳扩展,直到试样破裂,应变量出现激增。整个实验过程中,剪 45° 应变都比较大,且一直保持在较大值处。另外4个方向应变也都保持在一个稳定水平,随时间变化不明显。剪 90° 方向(平行于载荷方向上)和剪 45° 方向的应变变化最明显,说明主破裂发生在这2个方向上,这和实验观测出的结果相一致。同时,由于混凝土材料的各向异性,混凝土内部应变演化规律也表现为复杂性,各个方向上的应变并不是都呈现出一个规律,即使存在规律重叠,但应变还是存在很大差异。

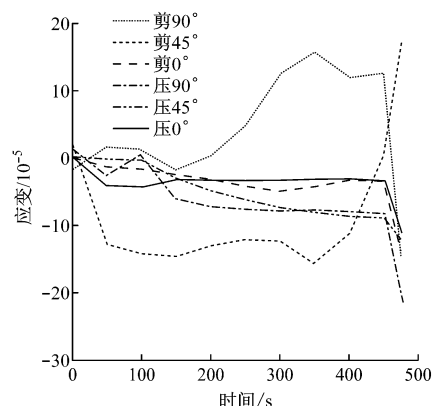


图5 不同时间段各个方向应变值

3.2 不同加载阶段声发射信号特征分析

混凝土试样在单轴压缩实验下,其应力、应变、声发射信号随时间的变化情况如图6所示。从图6

可以看出,在压密阶段微裂隙被压密,所以在加载初期,总的应变量开始增加,随即产生声发射信号^[15];在50~200 s时间段内,由于混凝土内部有局部裂隙生成,声发射信号会出现轻微突增;200~400 s为裂纹稳定扩展阶段,混凝土内部开始出现大量裂纹,并不断扩展、汇合,声发射信号表现出波动上升趋势,与此同时,应变量也不断增加;400 s以后,更多的裂纹汇合贯通,声发射变形破裂加剧,声发射信号也急剧增加;加载至475 s时试样整体失稳破裂,声发射信号达到峰值,总应变量也达到最大值。综上,在整个加载过程中,混凝土试样内部的破裂演化过程和声发射信号呈明显的正相关性。

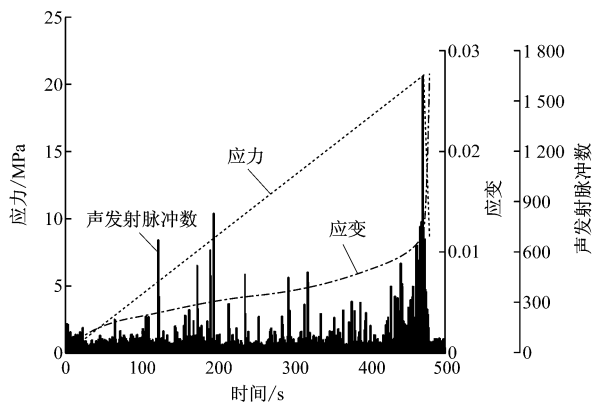


图6 受载过程中声发射特征

4 结论

研究受载混凝土试样内部不同方向上应变随时间的变化规律及声发射特征对于认识内部裂隙的演化规律具有重要的指导意义,同时有助于揭示混凝土受载破裂机理。本文得出以下结论:

(1) 在压密阶段,不同方向应变片所测的应变量都比较小,声发射脉冲数较少。

(2) 在裂隙稳定扩展阶段,试样内部应变稳定增加,不同方向的局部应变量有明显不同,其中在剪90°和压45°方向上的应变量较之其他方向最为明显;声发射信号呈现稳定增长趋势,由于试样局部出现破碎,会出现短暂的声发射信号激增现象。

(3) 在临界失稳前,局部变形量快速增加,声发射信号也急剧增加,试样破裂时,各方向的局部应变量及声发射脉冲数均达到峰值。

参考文献:

- [1] 赖于树,熊燕,程龙飞.混凝土受载试验全过程声发射特性研究与应用[J]. 建筑材料学报,2015,18(3): 380-386.
- [2] 谢和平.岩石、混凝土损伤力学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1998:189-201.
- [3] 胡少伟,安康,陆俊.大尺寸混凝土试件断裂过程中的声发射信号特性分析[J]. 水利水电技术,2014, 45(10):110-114.
- [4] 仲路云.测量岩体动应变的应变砖[J]. 岩土力学, 1983,4(1):87-91.
- [5] 饶俊.矿山地压相似材料模型应力测量的应变砖法[J]. 南方冶金学院学报,1998,19(2):91-95.
- [6] TANG C A, XU X H. Evolution and propagation of material defects and Kaiser effect fraction[J]. Journal of Seismological Research, 1990,13(2):203-213.
- [7] LAVROV A. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(2):151-171.
- [8] 孙强,薛雷.砂岩脆性破坏过程中声发射信息试验研究[J]. 固体力学学报,2012,33(5):541-547.
- [9] 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.
- [10] 张茹,谢和平,刘建锋,等.单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006, 25(12):2584-2588.
- [11] 董毓利,谢和平,李玉寿.砼受压全过程声发射特性及其损伤本构模型[J]. 力学与实践,1995, 17(4): 25-28.
- [12] 纪洪广,蔡美峰.混凝土材料声发射与应力-应变参量耦合关系及应用[J]. 岩石力学与工程学报,2003, 22(2):227-231.
- [13] 尤明庆.岩石的力学性质[M]. 北京:地质出版社, 2007.
- [14] 王学滨.不同强度岩石的破坏过程及声发射数值模拟[J]. 北京科技大学学报,2008,30(8):837-843.
- [15] 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[J]. 应用声学,2011,30(2):112-117.