DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.04.013

王孝政, 彭刚, 罗曦, 等. 混凝土单轴循环加卸载试验及声发射特性[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 92-97. (WANG Xiaozheng, PENG Gang, LUO Xi, et al. Concrete under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics [J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 92-97.)

混凝土单轴循环加卸载试验及声发射特性

王孝政,彭 刚,罗 曦,肖 杰

(三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:利用 10 MN 大型多功能液压伺服静动力三轴试验系统和 SAEU2S 声发射信号采集系统,研究了单轴循 环荷载作用下混凝土强度变化及声发射特征。结果表明:混凝土在单轴循环荷载作用下,其抗压强度与回弹值 的比值随应变速率的增加而增大,通过线性拟合发现混凝土抗压强度与回弹值的比值率效应表现明显;混凝土 在单轴循环加卸载过程中,声发射定位研究揭示了混凝土开裂位置及发展状况,并将混凝土变形分为4个阶段 进行研究,结合每个阶段声发射累积定位数情况,分析了混凝土损伤变化;对循环加卸载过程中声发射累积定 位数的分析发现,卸载后再次至最大历史应力水平前大量声发射信号产生说明混凝土不满足 Kaiser 效应;基于 声发射定位数与应力随时间变化关系的研究认为,混凝土强度与应力水平有关,与内部结构也有关。

循环荷载在大坝、桥梁等工程结构中非常普遍,如三峡大坝长期水位在145~175 m 间变动,这种水位变 化会给坝体带来慢速的循环荷载,而桥梁上来回穿梭的机车则带给这些结构快速的循环荷载,还有地震作用 下,所有的结构都会受到地震荷载的往复作用。循环荷载可能会对结构造成非常不利的影响,因此在进行循 环荷载下结构安全性能分析的时候,必须要充分考虑混凝土材料的性能。目前国内外学者对混凝土等脆性 材料的循环加载做了相关研究,魏元龙等[1]认为循环加卸载和裂隙的共同作用会降低页岩强度。闫东明[2] 利用混凝土试件的变幅循环加载试验,探究了变幅循环对混凝土动态强度以及变形的影响,得出循环增幅对 混凝土动态强度影响较小的结论。胡海蛟等[3]进行了5种应变速率下的混凝土循环加卸载压缩试验,分析 其力学参数,认为混凝土峰值应力和弹性模量对应变速率的敏感性强,但峰值应变对应变速率的变化表现出 较大的离散性。周家文等[4]通过对砂岩单轴循环加卸载的试验研究,发现砂岩的循环加卸载强度要比单轴 压缩强度小很多,弹性模量在第1次循环加卸载增大之后将缓慢减小。唐云清等^[5]对高强混凝土徐变的研 究认为,循环荷载作用下的徐变要明显大于恒载作用下的徐变。Zhu 等^[6]对桥梁4个混凝土芯样进行的声 发射试验研究发现,芯样的应力分布与声发射事件累计数之间存在一定关系,通过声发射技术,可以测得混 凝土损伤程度。徐速超等[7]采用声发射技术对矽卡岩单轴循环加卸载进行了研究,将矽卡岩在单轴压缩作 用下声发射曲线分为压密、弹性、塑性、峰后屈服四个阶段,并根据不同的声发射情况,得出随着加卸载循环 次数的增加,费拉西蒂比逐渐变小的结论。郭庆华等^[8]对混凝土声发射信号频率特征的研究认为,低强度 混凝土声发射活跃期在弹性阶段,而高强度混凝土则处于极限荷载处。

综上所述,目前对循环荷载作用下材料的研究还多集中于岩石等脆性材料,对混凝土的研究还十分有限。因混凝土力学性能与岩石表现相近,故岩石等脆性材料循环荷载下的研究对本文研究有重要参考价值。

收稿日期: 2015-07-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51279092);三峡大学科研创新项目(CX2015025)

作者简介:王孝政(1991—),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事混凝土材料动力特性及结构抗震研究。

E-mail: 864039535@qq.com 通信作者:彭刚(E-mail: gpeng158@126.com)

国外有用声发射预测岩爆^[9]的案例,并且声发射技术可以探测材料内部开裂损伤状况,因此本文结合声发 射技术的混凝土循环加载试验,对分析混凝土受循环荷载作用时的力学性能状况及破坏发展规律有重要意 义,对工程中混凝土材料损伤检测也具重要参考价值。

1 试验设计

1.1 试验设备

力学试验设备采用 10 MN 大型多功能液压伺服静动力三轴仪,可进行无侧压及有侧压循环加卸载试验 等。该设备竖向出力最大静压力可达 10 000 kN,最大动压力为 5 000 kN;竖向油缸行程为 400 mm,水平活 塞行程为 200 mm。有负荷、变形、位移等多种方式来控制 3 个方向的加载速度,可对数据进行同步采集和处 理,同时该系统还能执行事先编制好的循环加卸载指令。

1.2 试件制备

试件为 300 mm 混凝土立方体试块,选用宜昌三峡水泥有限公司 P·O 42.5 级水泥,对水泥进行胶砂试 验测试,其 3 d,28 d 的抗压和抗折强度均满足相应规范要求;搅拌水采用可饮用自来水;粗骨料为 5~40 mm 连续级配的碎石,细骨料为细度模数 2.3 的连续级配河砂。材料配比为:粗骨料1 150.0 kg/m³;细骨料 765.5 kg/m³;水 168.5 kg/m³;水泥 300 kg/m³;水灰比 0.56。

1.3 试验加载

试验前,通过回弹仪对混凝土4个侧面进行回弹测试,以表征混凝土基本力学情况。试验主要步骤如下:

(1)装样。将试件放置在垫板上,除去试件表面灰尘,通过橡胶锤锤击对试件位置进行校正,缓缓推入小车,保证小车底座、试件的中心和加载柱中心严格对中。

(2)安装声发射探头和变形计。将混凝土试件 4 个侧面清理干净,按照定位要求将声发射探头贴在试件指定的部位;连接好变形计并进行量程测试。

(3) 预加载。先对试件进行预加载,启动辅助伺服油源,缓慢加载至试件与上部传力柱接触,防止加载 过快,碰撞产生初始损伤,当荷载加载到10 kN并保持稳定后再预加载至20 kN。

(4)正式加载。将油压调整到 15 MPa,采用变形控制进行加载试验,加载速度分别为 0.18,0.9,1.8, 18,90 mm/min,加载过程采用程序控制,加载同时开始采集声发射信号,加载直至试件破坏为止。

(5)后期处理。试件破坏后,停止加载试验及声发射信号采集,保存试验数据,然后进行清理工作。

2 试验结果分析

2.1 强度变化

混凝土作为一种人工复合材料,单个试件具有离散型,以往的混凝土试验过程中通常选取一定数量的试件进行极限抗压强度试验,然后取用平均值的方法来表征混凝土试件的强度。采用这些方法虽然在实际试验过程中具有良好的可操作性,但掩盖了混凝土个体试件的力学性能,通过回弹法检测混凝土抗压强度的方法能够反映混凝土个体间的差异。为了更真实反映混凝土性能,有学者就不同回弹仪对混凝土强度进行了分析^[10]。

先对混凝土试块进行回弹测试,然后进行不同应变 速率下单轴循环加卸载试验,得到混凝土抗压强度与平 均回弹值比与应变速率的变化关系,如表1所示。

以抗压强度对平均回弹值的比值 f_c/f_0 为纵轴,应 变速率对数 $lg(\varepsilon_d/\varepsilon_s)$ 为横轴对试验数据进行拟合如 图 1 所示,拟合相关系数为0.961 9。由表 1、图 1 可知

表1 混凝土强度	
----------	--

Tab. 1 Concrete strength							
加载速率(s ⁻¹)	10^{-5}	5×10 ⁻⁵	10^{-4}	10 ⁻³	5×10 ⁻³		
抗压强度 f _c (MPa)	51.40	52.24	55.28	53.83	55.39		
平均回弹值f ₀ (MPa)	50.6	50.6	52.9	51.2	52.1		
$f_{\rm c}/f_0$	1.017	1.032	1.045	1.051	1.063		

随着应变速率对数的增加,抗压强度与平均回弹值的比 值呈现明显的线性增加趋势,应变速率的增大增加了混 凝土抗压强度,这与其他学者的研究相一致^[3,11]。

2.2 声发射特征

本文借鉴文献[12]的研究方法对混凝土加载进行 定位分析,在试验过程中利用4个传感器布置于混凝土 试件4个侧面来实现对AE信号源的定位。试件在应 变速率10⁻⁵/s条件下的单轴循环加卸载前声发射传感 器布置见图2,坐标分别为1(150,0,150),2(300,130, 150),3(200,300,170),4(0,150,200)。对试件加载的 同时开始采集声发射信号,在试件受压过程中,混凝土



图 1 混凝土相对抗压强度与应变速率关系

Fig. 1 Relationship between concrete relative compressive strength and strain rate

试件表面逐渐开始出现裂纹,根据声发射信号采集及定位原理,不但可以采集信号,还能进一步定位裂缝产 生位置。随着荷载增大和裂缝的发展,贯通试件表现出局部剥离现象。该现象在循环加卸载达到峰值应力 前尚不明显,而在峰值应力后随着变形增大,试件表面混凝土的剥离更加明显,甚至局部成块脱落。由于声 发射传感器是通过耦合剂附着在混凝土试件侧表面,会导致峰值应力后传感器因混凝土开裂掉落或随局部 混凝土块与整体试件脱离而失效,传感器的失效将直接导致声发射信号定位的终止。

图 2 为试件在应变速率为 10⁻⁵/s 条件下的循环加卸载试验过程中不同阶段声发射定位图。图 2 中红色 实心点记录了声发射采集系统实时采集信号的状况,从图 2 可见,加载初期裂缝在混凝土表面附近分布较 多,随着荷载增大,裂缝逐渐发展,混凝土开裂越来越多,采集到的声发射定位点也越来越多。





Fig. 2 AE event mapping under conditions of strain rate 10^{-5} /s

图 2(b)与 2(a)相比,荷载增大,造成了混凝土开裂,采集到的声发射定位点也相对较多。比较图 2(c) 与图 2(d)发现,第1次卸载后到第2次加载至前次最大荷载前声发射定位数增加了很多。而比较图 2(b) 与图 2(c)荷载从首次加载的 30% *f*。到首次循环加卸载的峰值应力,然后卸载到 50% *f*。声发射定位数增加并 不是很多,这与传统认识声发射定位数主要产生在加载阶段相矛盾。

通过加载控制软件中应力与时间关系图,结合声发射累积定位数与时间关系,对比可得试件循环加卸载 过程中的声发射事件累积定位数变化曲线,图 3 为应变速率分别为 5×10⁻⁵/s 和 10⁻⁴/s 的相关曲线。



图 3 应变速率 5×10^{-5} /s 和 10^{-4} /s 条件下 AE 事件定位数与应力关系 Fig. 3 Relationships between AE event location and stress under conditions of strain rate of 5×10^{-5} /s and 10^{-4} /s

图 3 描述了声发射事件累积定位数随着应力的变化逐渐增加关系,因声发射探测器附着在试块表面,声 发射探测器在加载过程中会因混凝土开裂、脱落而失效,本文试验至少 4 个探测器才能进行准确定位,探测 器脱落后不再进行定位记录,累积定位数不再发生变化,探测器脱落后累积定位数未在图中画出,所以图示 累积定位数曲线不与加载曲线一致。在图 3 中,混凝土的变形主要经历了 4 个阶段:第1阶段(OA 段)为混 凝土原生裂纹的起始压密阶段,在该阶段中 AE 事件在试件内部随机出现且总量较少,混凝土试件有少量裂 纹产生;第2阶段(AB 段)主要为混凝土试件的线弹性阶段,在该过程中试件内部逐渐出现起始微裂纹,并 在应力的不断增大下,AE 事件量快速增多,微裂纹产生并逐渐发展;第3阶段(BC 段)为裂纹的萌生以及稳 定扩展阶段,该阶段应力未达到峰值,声发射事件数稳定增加;第4阶段(CD 段)为裂纹贯通发展阶段,该过 程中 AE 事件量迅速增加,在应力作用下裂纹在已经出现并相对独立的损伤区域中相互贯通而形成宏观上 的裂缝,位于试件外侧的混凝土开始脱落,裂纹向试件内部发展并最终导致整个试件失稳破坏。

图 3(a) 所示试件,第1次卸载时声发射定位数增加很少,而第2次卸载阶段声发射定位数有明显增加。 图 3(b) 所示试件,无论加载阶段还是卸载阶段声发射定位数都在增加。周继凯等^[13]对全级配混凝土静动 加载试验研究表明混凝土中存在 Kaiser 效应,而 Kaiser 现象是指当试件在循环荷载作用下,如果荷载没有达 到历史上的最大应力水平,则试件不会有声发射现象,或者声发射现象很弱,而当荷载超过先期荷载时,则出 现声发射现象的剧变。本文试验卸载阶段声发射定位数增加都可以说明混凝土在单轴循环加卸载作用下不 具有 Kaiser 效应。对于脆性材料这种特性,Li等^[14]在对岩石的研究中也表明,单轴压缩试验 Kaiser 效应不 一定会出现。图3的描述也说明了声发射定位数的产生不仅与荷载有关,笔者认为还和混凝土内部骨料分 布有关,还可能受试验条件限制。由图3可见,混凝土在循环荷载下,混凝土首次压缩至峰值应力前卸载后, 再次加载时其最大应力有所提高,循环加卸载对混凝土强度有一定增加。尤明庆等^[15]的研究证明力循环荷 载对大理岩强度略有增加,而图3的声发射定位数并没有明显增加,即可认为再次加载时能量并非是混凝土 内部开裂所吸收,可能是混凝土之前开裂面相互摩擦增大了其强度。

3 结 语

通过不同应变速率下,混凝土单轴循环加卸载试验,对混凝土抗压强度以及结合声发射定位数对混凝土 开裂状况进行了分析,得出以下结论:

(1)混凝土抗压强度随着应变速率增加而增大,抗压强度对平均回弹值的比值呈现明显的线性增加趋势,同时应变速率越大,混凝土循环加载次数越少,混凝土强度率效应越明显,混凝土总变形量越小,相应循环加载次数也越少。

(2)应力和时间关系图与声发射数据采集的时间对比,了解不同应力水平下任意时刻的声发射定位情况,为分析某一时刻混凝土开裂提供了依据。在应变速率 5×10⁻⁵/s 条件下,AE 事件定位数及应力与时间的 关系图中,将混凝土开裂分为4 个阶段研究,与岩石等脆性材料相一致,结合每个阶段声发射累积定位数情况,分析了混凝土损伤变化。

(3)混凝土卸载后,再次加载未达到历史最大应力水平,有大量声发射信号产生,这说明混凝土在单轴循环加卸载作用下不具有 Kaiser 效应。而混凝土首次压缩至峰值应力前卸载后,再次加载时其最大应力有所提高,循环加卸载可以使混凝土强度略有增加。

参考文献:

- [1] 魏元龙,杨春和,郭印同,等. 单轴循环荷载下含天然裂隙脆性页岩变形及破裂特征试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36 (6): 1649-1658. (WEI Yuan-long, YANG Chun-he, GUO Yin-tong, et al. Experimental investigation on deformation and fracture characteristics of brittle shale with natural cracks under uniaxial cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (6): 1649-1658. (in Chinese))
- [2] 闫东明. 混凝土动态力学性能试验与理论研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (YAN Dong-ming. Experimental and theoretical study on the dynamic properties of concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [3] 胡海蛟,彭刚,谢玖杨,等. 混凝土循环加卸载动态损伤特性研究[J]. 工程力学, 2015, 32(6): 141-145. (HU Hai-jiao, PENG Gang, XIE Jiu-yang, et al. Study on dynamic behavior of concrete by cycle loading and unloading conditions [J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(6): 141-145. (in Chinese))
- [4] 周家文,杨兴国,符文熹,等. 脆性岩石单轴循环加卸载试验及断裂损伤力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1172-1183. (ZHOU Jia-wen, YANG Xing-guo, FU Wen-xi, et al. Study on the mechanical properties of single axle cyclic loading and unloading tests of brittle rocks and fracture damage mechanics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(6): 1172-1183. (in Chinese))
- [5] 唐云清,柯敏勇,刘海祥,等.循环荷载作用下高强混凝土收缩徐变试验研究[J].水利水运工程学报,2012(6):7-15. (TANG Yun-qing, KE Min-yong, LIU Hai-xiang, et al. Creep experiments for high strength concrete with cycle loading[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(6):7-15. (in Chinese))
- [6] ZHU H P, HUANG M S, CHEN X Z. Experimental study of concrete damage evaluation based on acoustic emission technique [J]. Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, 2006, 1(2): 363-368.
- [7] 徐速超, 冯夏庭, 陈炳瑞. 砂卡岩单轴循环加卸载试验及声发射特性研究[J]. 岩土力学, 2009(10): 2929-2934. (XU Su-chao, FENG Xia-ting, CHEN Bing-rui. Experimental study of skarn under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009(10): 2929-2934. (in Chinese))
- [8] 郭庆华, 郤保平, 李志伟, 等. 混凝土声发射信号频率特征与强度参数的相关性试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(4):1482-1488. (GUO Qing-hua, XI Bao-ping, LI Zhi-wei. Experimental research on relationship between frequency characteristics of acoustic emission and strength parameter in concrete[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(4): 1482-1488. (in Chinese))
- [9] KATSUYAMA T. 声发射(AE)技术的应用[M]. 冯夏庭,译. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 3-4. (KATSUYAMA T. Application of acoustic emission technique [M]. Translated by FENG Xia-ting. Beijing: China Metallurgical Industry Press, 1996: 3-4. (in Chinese))
- [10] 魏连雨,马腾飞,魏凯,等. 高强混凝土回弹仪检测混凝土抗压强度的试验研究[J]. 混凝土, 2015(2): 139-141, 145.

(WEI Lian-yu, MA Teng-fei, WEI Kai, et al. Experiment research on testing compression strength of concrete with high strength concrete rebound hammer[J]. Concrete, 2015(2): 139-141, 145. (in Chinese))

- [11] 彭刚, 王乾峰, 梁春华. 有压孔隙水环境中的混凝土动态抗压性能研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 11-18. (PENG Gang, WANG Qian-feng, LIANG Chun-hua. Study on dynamic compressive properties of concrete under pore water pressure environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1):11-18. (in Chinese))
- [12] 康玉梅. 基于小波分析的岩石类材料声发射源定位方法研究[D]. 沈阳:东北大学, 2009. (KANG Yu-mei. The acoustic emission source location method of rock materials based on wavelet analysis[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. (in Chinese))
- [13] 周继凯, 吴胜兴, 沈德建, 等. 全级配混凝土动态弯拉试验技术研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006,34(4):
 441-443. (ZHOU Ji-kai, WU Sheng-xing, SHEN De-jian, et al. Research on dynamic bending test of full graded concrete[J].
 Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2006, 34(4): 441-443. (in Chinese))
- [14] LI C, NORDLUND E. Assessment of damage in rock using the Kaiser effect of acoustic emission [J]. Experimental Verification of the Kaiser Effect in Rocks, 1993, 30(7): 943-946.
- [15] 尤明庆,苏承东. 大理岩试样循环加载强化作用的试验研究[J]. 固体力学学报, 2008, 29(1): 66-72. (YOU Ming-qing, SU Cheng-dong. Experimental study on strengthening of marble specimen in cyclic loading of uniaxial or pseudo-triaxial compression[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(1): 66-72. (in Chinese))

Concrete under uniaxial cyclic loading and unloading test and acoustic emission characteristics

WANG Xiao-zheng, PENG Gang, LUO Xi, XIAO Jie

(College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Strength variation and acoustic emission characteristics of concrete under the conditions of uniaxial cyclic loading and unloading are studied by using a 10-MN large multifunctional hydraulic servo static and dynamic triaxial test equipment and a SAEU2S acoustic emission acquisition system. Testing analysis results show that under the uniaxial cyclic loads, the ratio of concrete compressive strength to rebound values increases with the increase of a strain rate. Through linear fitting, it is found that the ratio of the concrete compressive strength to the rebound values concering the rate effect is apparent. During the uniaxial cyclic loading and unloading process of concrete, experimental studies of the acoustic emission location are carried out to reflect the position and development of concrete cracks. Then 4 deformation stages of concrete are divided; with each stage of the acoustic emission cumulative number of positioning, analysis of the damage of concrete is made; the acoustic emission cumulative fixed number of the cyclic loading and unloading process is analysed. Unloading again to the maximum stress level before a large number in history shows that the acoustic emission signal generated under such conditions does not meet the Kaiser effect; based on the relationships between the number of the acoustic emission and the time variation of the stresses, the concrete strength not only relates to the stress level, but also to the internal structure.

Key words: concrete; uniaxial compression; strain rate; acoustic emission; cyclic loading and unloading