

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.02.030

循环荷载下含裂缝缺陷的混凝土 断裂特性试验研究

马振洲^{1,2}, 钟红^{1,2}, 李云途^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 工程抗震研究所, 建设工程学部水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为研究含裂缝缺陷的混凝土在循环荷载作用下的断裂性能, 利用 MTS 试验机对带有预制裂缝的混凝土三点弯曲梁试件进行了循环加载试验, 获得了荷载-裂缝张口位移试验全曲线, 据此得到了试验曲线的包络线和共同点轨迹线, 并计算了试件的断裂能和滞回环的耗散能。通过对循环加载试验声发射信号的采集, 分析了混凝土试件在该荷载历史下的声发射特性。结果表明: 循环加载曲线的包络线与单调加载曲线相吻合, 且共同点轨迹线与包络线的形状相似; 两种循环加载试验得到耗散能与循环次数的曲线趋势相同, 形状相似; 循环加载试验中的声发射参数可以表征混凝土试件循环加载全过程的受力状态, 并呈现出明显的 Felicity 效应。

关键词: 预制裂缝; 循环加载试验; 包络线; 共同点轨迹线; Felicity 效应

中图分类号: TU528.07

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)02-0157-05

Experimental Study on Compressive Properties of Defective Concrete Under Cyclic Loading

MA Zhenzhou^{1,2}, ZHONG Hong^{1,2}, LI Yuntu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. Institute of Earthquake Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to analyze the fracture characteristics of concrete with under cyclic loading, the cyclic loading tests were carried out on concrete three-point bending beam specimens with prefabricated crack by the defects MTS experimental machine, and the full curves of load-crack opening displacement were obtained for the whole testing process, from which the envelope curves and the common point curves of the testing curves were obtained, and the fracture energy of the specimens were calculated as well as the dissipated energy of hysteresis loops. The acoustic emission characteristics of concrete specimens under the load history were analyzed by collecting acoustic emission signals of cyclic loading tests. It was found that the envelope curves of the cyclic loading were consistent with the monotonic loading curves, and the shapes of the common-point trace curves were similar to the envelope curves. The two cyclic loading tests showed that the dissipated energy and the number of cycles had the same trend and similar shape. The acoustic emission parameters in the cyclic loading tests could characterize the stress state of concrete specimens during cyclic loading and showed a significant Felicity effect.

Keywords: prefabricated crack; cyclic loading test; envelope curve; common-point trace curve; Felicity effect

混凝土作为重要的工程材料, 被广泛应用于坝体、桥梁等实际工程当中。在自然环境中, 混凝土实

收稿日期: 2017-11-29

修稿日期: 2017-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579033); 国家重点研发计划项目(2016YFB0201000, 2016YFC0401600)

作者简介: 马振洲(1990—), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向为混凝土、岩石界面断裂试验与数值模拟。

E-mail: zhenzhouma@mail.dlut.edu.cn

体结构往往会遭遇地震荷载、风荷载或者动水压力的反复作用,这对结构的安全性非常不利。由于混凝土的行为特性主要取决于荷载历史,因此对循环荷载作用下混凝土材料力学特性和机理的研究便非常重要。近年来,多名学者就此展开了相关研究。Yankelevsky D Z 等^[1]对混凝土试件进行了不同荷载历史下的拉伸试验,提出了描述整个单调加载和循环加载下的响应表达式。Bahn B Y 等^[2]对随机循环荷载历史下混凝土的特性进行了参数研究和试验研究,并提出了循环应力-应变关系的物理模型。Aslani F 等^[3]研究了无约束混凝土的滞回应力-应变模型受循环加载时的性质,并采用非线性有限元程序对所提出的本构模型进行了可靠性分析。Chen X 等^[4]研究了应变率对混凝土峰值后应力-应变响应的影响,发现循环加载的包络曲线与单调加载曲线相吻合,且应力释放过程与应变率无关,随后引入 Weibull 分布模型^[5],对峰后循环荷载作用下混凝土的损伤演化进行了统计分析。Long Y 等^[6]建立了各向异性损伤模型,采用非线性卸载-线性再加载方式模拟了混凝土的滞回性能,发现各向异性损伤模型适用于循环荷载作用下混凝土结构的非线性分析。闫东明等^[7]利用 MTS 试验机对哑铃形混凝土试件进行了变幅循环荷载作用下的单轴动态拉伸试验,发现混凝土内部不可恢复的永久变形幅度随着循环次数的增加而增大。Tam M T 等^[8-10]进行了循环加载下混凝土试件的声发射特性试验,对混凝土的 Kaiser 效应及声发射特性进行了分析。彭刚等^[11]通过混凝土在不同加载速率下的单轴压缩试验研究了循环加卸载下混凝土损伤破坏特性的率效应等等。

以上研究中的混凝土试件形式均为完整状况,而实际混凝土结构的破坏主要由于内部存在缺陷,在荷载作用下缺陷部位应力集中导致结构开裂,直至失稳破坏。为了研究含裂缝缺陷的混凝土在循环荷载作用下的断裂特性(主要为塑性阶段的特性),本文采用 MTS 试验机对带有预制裂缝的混凝土三点弯曲梁试件进行单调加载试验和循环加载试验,并对循环加载试验的声发射特性进行分析,为实际工程结构的安全评价提供依据。

1 试验方案

采用 MTS322 电液伺服试验机对带有预制裂缝的混凝土三点弯曲梁试件进行竖向单调加载和循环加载试验。试件尺寸为 500 mm × 100 mm × 100 mm,初始裂缝深度为 30 mm,如图 1 所示。混凝土各材料的配合比为水泥:砂:石子:水 = 1.00:1.83:3.41:0.55,各力学性能参数见表 1。

表 1 材料力学参数

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度 /MPa
混凝土	30.2	0.2	2400	44.1

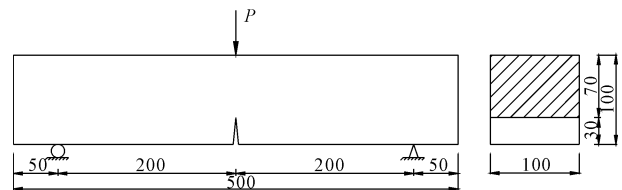


图 1 三点弯曲梁(单位:mm)

单调加载试验采用裂缝张口位移 CMOD 进行控制,控制速率为 3×10^{-3} mm/s。循环加载试验需首先确定每个循环过程开始卸载时裂缝张口位移的数值。假设混凝土试件在单调加载试验中达到最终破坏时的裂缝张口位移为 u_m ,用时为 t_m ,以该 $u-t$ 线作为包络线,构造循环加载的位移曲线,计算三角形波在低频率($f=1$ Hz)和高频率($f=3$ Hz)时的裂缝张口位移值。其中第一个三角形波开始卸载时的位移 Δu_1 取为单调加载试验采集到的荷载-裂缝张口位移曲线中峰值荷载所对应的裂缝张口位移的三分之一,至卸载完成时所用时间为 $\Delta t'$ 。之后的每个加卸载过程用时均为 Δt ($\Delta t=1/f$),据此计算得到每个循环过程开始卸载时的位移,并输入到加载设备的程序中。

循环加载试验的加载过程采用 CMOD 进行控制,控制速率与单调加载试验相同。由于实际卸载过程中裂缝张口位移的值并不能恢复到零,为了安全有效地控制整个试验过程,卸载时采取力控,并将试件的受力下限设定为 0.2 kN。具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案

试验加载形式	试件尺寸/mm	裂缝深度/mm	循环次数/次	控制方式	试件数目/个
单调加载	500 × 100 × 100	30	0	CMOD 控	3
循环加载	500 × 100 × 100	30	≥ 10	加载,CMOD 控	3
			≥ 30	卸载,力控	3

混凝土试件的安装方式见图 2。通过刀口将引伸计固定在试件底部开缝处,用来控制并采集裂缝张口位移。在试件前后分别布置 LVDT 位移传感器,用以测量加载点的位移。采用 PCI-2™ 声发射采集系统采集循环加载试验的声发射信号,将声发射传感器布置在试件前后表面的裂缝附近,前置放大器带宽为 0.01 MHz ~ 2.00 MHz,增益和阈值值分别设置为 40 dB 和 35 dB。



图 2 混凝土试件的安装方式

2 试验结果与分析

2.1 荷载 - 裂缝张口位移曲线

单调加载试验和循环加载试验均得到了完整的 P (荷载) - u_m (裂缝张口位移)曲线,选取并展示各组试验采集到具有代表性的 $P - u_m$ 曲线,见图 3,发现循环加卸载过程的外围轮廓与单调加载试验得到的 $P - u_m$ 曲线较吻合,且只有第一个未达到峰值荷载前的循环加卸载路径基本重合,而之后的路径呈滞回环状,表明混凝土试件受力变形不再是弹性变形。

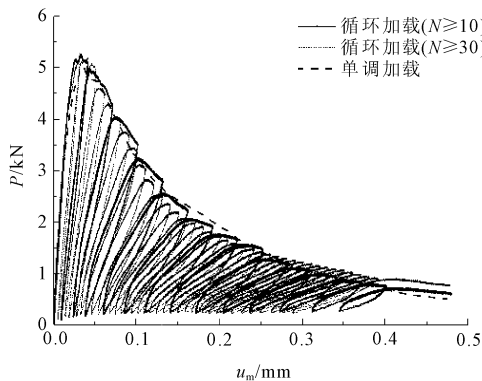


图 3 $P - u_m$ 曲线

图 4 和图 5 分别给出两种循环加载试验的外包络线和共同点迹迹线^[12](从卸载初始点卸载到荷载设定的下限再进行加载,会得到一交点,称为共同点。将加卸载过程中所有交点进行连接,绘制成的

曲线即为共同点迹迹线),共同点迹迹线与外包络线形状相似,二者的间距呈现先增大后减小的趋势。随着加卸载次数的增加,经过共同点之后,再加载曲线的斜率明显减小,裂缝张口位移增幅较大,表明混凝土内部裂缝进一步扩张或者有新的裂缝产生,损伤积累量及残余变形量增加,试件刚度的退化程度加快。

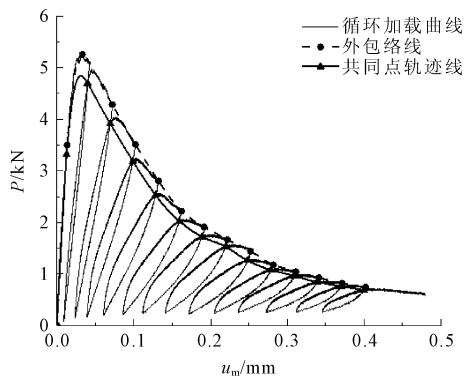


图 4 低循环次数加载试验的包络线和共同点迹迹线

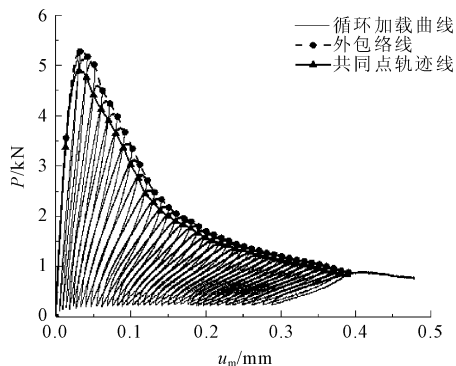


图 5 高循环次数加载试验的包络线和共同点迹迹线

2.2 断裂能与耗散能

断裂能 G_f ^[13]是断裂过程区向裂缝开口方向扩展单位面积的能量损耗。三点弯曲梁试件的断裂能可通过 $P - \delta$ (加载点的位移,取两个 LVDT 数据的平均值)曲线进行计算,计算公式如下:

$$G_f = \frac{\int_0^{\delta_{\max}} P d\delta + mg\delta_{\max}}{A_{\text{lig}}} \quad (1)$$

式中,积分项为 $P - \delta$ 曲线与 x 坐标轴所围成的面积; mg 为混凝土试件的重力; δ_{\max} 为试件破坏时采集到的加载点位移; A_{lig} 为断裂带的净面积。

单调加载试验中混凝土试件的断裂能由试验采集到的 $P - \delta$ 全曲线(与 $P - u_m$ 曲线的形状相似)进行计算,循环加载试验中试件的断裂能按照 $P - \delta$ 曲线的包络线进行计算,加载点位移 δ 均取 0.46 mm,计算结果见表 3。

受循环荷载作用,三点弯曲梁试件在加卸载过程中得到的 $P - \delta$ 曲线同样会出现闭合的滞回环,以耗散能(u)表示滞回环的面积与断裂带净面积的比值,分别取低循环次数和高循环次数加载试验的前 10 次循环和前 30 次循环进行分析,并将总耗散能(U)的计算结果列于表 3。将 3 组试验数据取平均值,得到了耗散能与循环次数之间的关系曲线和拟合曲线,分别如图 6、图 7 所示。

表 3 计算结果

单位: J/m^2

加载类型	试验号	断裂能 G_f	G_f 平均值	总耗散能 U	U 平均值
单调加载试验	1	133.4			
	2	159.3	148.5	—	
	3	152.7			
低循环次数加载试验	1	138.6		45.3	
	2	140.9	145.1	41.7	44.2
	3	155.9		45.6	
高循环次数加载试验	1	167.1		116.1	
	2	141.8	149.7	119.3	119.7
	3	140.2		123.8	

从表 3 计算结果看出,两种循环加载试验和单调加载试验得到的断裂能大小基本相同,说明单调加载时的 $P - \delta$ 曲线和循环加载时的 $P - \delta$ 曲线的包络线吻合较好,并且与 x 轴所围成的面积相差不大;而在低、高循环次数下,试验的总耗散能相差较大,高循环次数加载试验的总耗散能为循环次数较低时的 2.7 倍,从荷载 - 加载点位移曲线中也发现,当循环次数较多时,滞回环非常密集,并出现部分区域重合,表明总耗散能与循环次数有关,其值在较高循环次数加载时更大,但不会超过该试件断裂能的值。

从图 6、图 7 中发现,两种循环加载试验得到耗散能与循环次数的关系曲线比较相似,随着循环次数的增加,耗散能总体均表现出先增加后减小的趋势。在第 1~2 次循环过程中,荷载达到峰值,而耗散能并未达到最大值,但在该过程中耗散能增长速率最快。对于低循环次数加载试验,耗散能的最大值出现在第 3 次循环过程当中,之后的第 4~10 次循环过程,耗散能基本呈线性下降,且整体 $u - N$ 曲线和拟合曲线吻合度较高;而在较高循环次数加载试验的第 3~8 次循环过程中,耗散能增长幅度较小,在第 8 次循环时达到最大值,之后逐渐减小,在第 12~26 次循环当中也基本呈线性减小的趋势,且拟合曲线的整体趋势和试验曲线相吻合,并与低循环次数的加载试验得到的试验曲线和拟合曲线类

似。以上表明耗散能的大小与峰值荷载无关。对比荷载 - 裂缝张口位移曲线发现,当耗散能达到最大值时,其滞回环面积并非最大,说明此时混凝土试件受力变形属于非线性范畴。

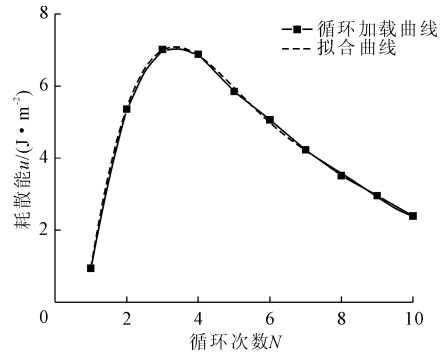


图 6 耗散能与循环次数(较低)的关系曲线

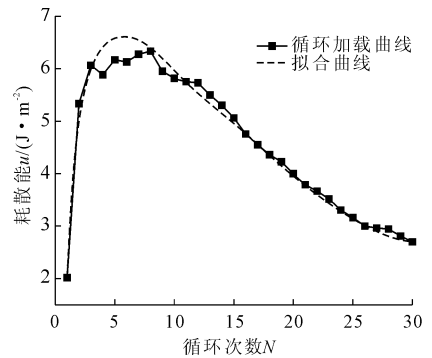


图 7 耗散能与循环次数(较高)的关系曲线

2.3 循环加载试验的声发射特性

声发射是材料异常部位在外界条件作用下发生损伤,并以弹性波形式释放应变能的现象^[14-15]。在荷载作用下,混凝土从产生损伤至断裂破坏的整个阶段中都有声发射信号产生。声发射信号在试件的每个阶段均会呈现出不同的特征并且能够反映出缺陷部位裂缝的产生、扩展以及试件发生断裂破坏过程的变化^[16]。在本循环加载试验中通过对三点弯曲梁试件声发射信号进行采集,得到了荷载及振铃计数与时间的关系图,分别见图 8 和图 9。

从图 8、图 9 中发现,声发射过程的记忆性(也称为不可逆性),即 Kaiser 效应,并未在本循环加载试验中体现。相反,图中每次循环的声发射参数(振铃计数)在达到前一次循环所加最大荷载之前便非常明显,表现出 Felicity 效应。由于声发射的记忆性与材料损伤程度相关^[17],而本循环试验在第 2 次循环之前的荷载已达到峰值,试验过程多处于塑性段。在该阶段试件损伤加剧,变形无法完全恢复到最初状态,并且混凝土内部的裂纹结构稳定性很差,继续加载将影响裂纹的分叉与合并,微裂纹通过不断发

展直至贯通,形成宏观裂纹,损伤程度进一步加剧,混凝土无法记忆此时的受力状态,因而 Kaiser 效应失效,出现 Felicity 效应。

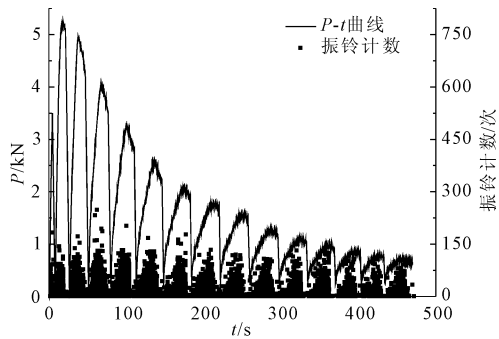


图8 低循环加载下荷载及振铃计数与时间的关系

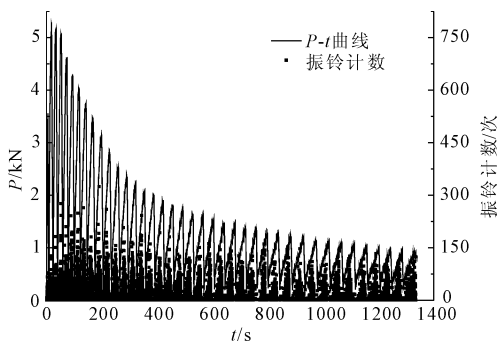


图9 高循环加载下荷载及振铃计数与时间的关系

在本循环加载试验中,振铃计数呈现出时域性,并能很好地表征混凝土试件循环加载全过程的受力状态。当循环加载次数较低时,振铃计数分布的更密集,而其活跃程度与高循环次数加载试验过程相近。同时,自第2次循环后,混凝土材料的 Felicity 比均小于1,表明混凝土材料的塑性阶段是产生 Felicity 效应的重要阶段。

3 结论

为研究含裂缝缺陷的混凝土在循环荷载作用下断裂特性,采用 MTS 试验机对带预制裂缝的混凝土试件进行了循环加载试验,通过分析得到以下结论:

(1) 试验获得了循环加载 $P - u_m$ 全曲线,其包络线与单调加载曲线相吻合,且共同点轨迹线与包络线的形状类似。随着循环次数增加,试件内部损伤积累量增加,刚度加速退化。

(2) 试件耗散能随循环次数的增加呈现先增加后减小的趋势,其大小与峰值荷载无关。在高循环次数加载试验中总耗散能的值更大,但其大小不会超过试件断裂能的值。

(3) 本试验中的声发射参数可以很好地表征循环加载全过程混凝土试件的受力状态。在低、高循

环次数加载过程中振铃计数的活跃度相近,并表现出明显的 Felicity 效应。

参考文献:

- [1] Yankelevsky D Z, Reinhardt H W. Response of plain concrete to cyclic tension[J]. Materials Journal, 1987, 84(5): 365-373.
- [2] Bahn B Y, Hsu C T T. Stress-strain behavior of concrete under cyclic loading[J]. Materials Journal, 1998, 95(2): 178-193.
- [3] Aslani F, Jowkarmeimandi R. Stress-strain model for concrete under cyclic loading[J]. Magazine of Concrete Research, 64(8): 673-685.
- [4] Chen X, Bu J, Xu L. Effect of strain rate on post-peak cyclic behavior of concrete in direct tension[J]. Construction and Building Materials, 2016, 124(16): 746-754.
- [5] Chen X, Xu L, Shi D, et al. Experimental study on cyclic tensile behaviour of concrete under various strain rates[J]. Magazine of Concrete Research, 2017: 1-16.
- [6] Long Y, He Y. An anisotropic damage model for concrete structures under cyclic loading - uniaxial modeling [C]// Journal of Physics Conference Series. Journal of Physics Conference Series, 2017: 012040.
- [7] 闫东明,林 皋,王 哲. 变幅循环荷载作用下混凝土的单轴拉伸特性[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 593-597.
- [8] Tam M T, Weng C C. Acoustic-emission kaiser effect in fly-ash cement mortar under compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1995, 7(4): 212-217.
- [9] 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.
- [10] 王 岩,王 瑶,路桂娟,等. 变幅循环荷载下混凝土轴拉声发射特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 45-49.
- [11] 彭 刚,王乾峰,陈灯红,等. 基于声发射参数的混凝土循环加卸载动态损伤破坏特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2015, 37(6): 1-9.
- [12] 过镇海,张秀琴. 混凝土在反复荷载作用下的应力-应变全曲线[J]. 工业建筑, 1981, 11(9): 14-17.
- [13] 陆 超,何佳文,董 伟. 四点剪切条件下岩石-混凝土界面裂缝扩展过程研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(5): 83-89.
- [14] 阳能军,姚春江,袁晓静,等. 基于声发射的材料损伤检测技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016.
- [15] 缪长青,梅明星,田洪金,等. 声发射技术在金属结构疲劳损伤中的应用研究进展[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(4): 23-27.
- [16] 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): 16-19.
- [17] 张 明,李仲奎,杨 强,等. 准脆性材料声发射的损伤模型及统计分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2493-2501.