

混凝土材料凯塞效应与 Felicity 效应 关系的实验研究 *

纪洪广

李造鼎

(北京科技大学资源工程学院 北京 100083) (东北大学 沈阳 110006)

1996 年 5 月 10 日收到

摘要 本文通过试验,证明了混凝土材料在往复加载过程中声发射过程凯塞效应和弗勒斯特效应的存在性.并对凯塞效应同弗勒斯特比的关系进行了详细研究.结果发现,混凝土材料在往复加载过程中其凯塞效应不仅具有应力上限,而且具有应力下限.应力上限是由混凝土材料的破坏机制决定的,而应力下限则决定于混凝土材料本身的结构特性.

关键词 混凝土材料,凯塞效应,弗勒斯特效应,应力界限.

Experimental study on the relationship of kaiser and felicity effect in concrete material

Ji Hongguang

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Li Zaoding

(Northeastern University, Shenyang 110006)

Abstract In this paper the existence of Kaiser- and Felicity-effects and their relationship are studied by experiments on concrete specimens under cycle loading condition. Not only the existence of the upper stress limit of Kaiser effect is proved, but also that of the lower stress limit is detected. The upper stress limit is determined by the failure process and the lower limit is determined by internal structure of concrete material.

Key words Concrete material, Kaiser effect, Felicity effect, Stress limit

1 引言

Rusch^[1]、McCabe^[2]等人通过实验证明,混凝土材料的声发射过程也具有凯塞效应. N. Feines 通过实验发现^[3],混凝土材料声发射的凯塞效应取决于前期加载所达到的最高应力水平,当初次加载的应力水平超过某一范围

时,凯塞效应消失.弗勒斯特(Felicity)在研究复合材料的声发射性能时发现,复合材料在往复加载过程中,声发射过程的不可逆程度同材料的损伤程度有关,即具有弗勒斯特效应.本文的目的是通过实验,验证混凝土试块在往复加载过程中凯塞效应和弗勒斯特效应的存在性,考察在往复加载过程中弗勒斯特比的变化

* 国家教委博士点基金项目

规律, 探求混凝土材料中凯塞效应的有效应力范围同弗勒斯特比的关系, 为凯塞效应的应用提供实验基础与理论依据.

2 试验设计

试验用试块为 $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}$ 的混凝土立方体和 $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ 的圆柱体, 配合比分别为: 水泥: 砂: 石子: 水 = $1:1.6:3.2:0.6$ 和 $1:1.35:3.15:0.55$. 最大骨料粒径 1 cm . 试块成型后 24 小时脱模, 然后在 20°C 的水中浸泡养护一周, 之后在标准养护室内养护 28 天. 所用加载设备为 15 吨普通压力机, 用沈阳计算机研究院设计生产的 AE-04 型声发射仪进行声发射检测. 传感器谐振频率为 140 kHz . 试验中设置总增益 100 dB , 其中前置放大器增益 40 dB , 主放大器增益 60 dB , 设置门槛水平 32 dB . 试验中加载循环级差为 5 kN . 试验过程中同时记录试块的应力-应变曲线. 加载及测试系统如图 1 所示.

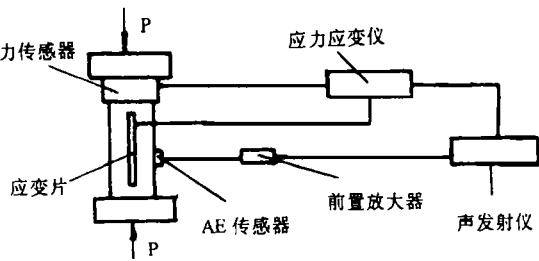


图 1 加载及测试系统示意图

3 试验结果分析

在往复加载过程中, 不同循环声发射的不可逆程度是不一样的. 这种不可逆程度可用不可逆比表示. 每一循环中, 声发射过程的不可逆比 (又称为 Felicity 比) 定义为:

$$FR(i) = \frac{P(i+1)}{P(i)} \quad (1)$$

式中 $FR(i)$ 为第 i 循环中的 Felicity 比; $p(i)$ 为第 i 次加载所达到的应力水平, MPa ; $p'(i+1)$ 为第 $i+1$ 次加载过程中恢复有效声发射时的应力水平, MPa .

根据凯塞效应的定义, 只有当 $FR(i) \geq 1$ 时凯塞效应才有效. 因此, 弗勒斯特比是对材

料声发射过程不可逆程度的更详细的描述. 为了证实混凝土材料在往复加载过程中声发射弗勒斯特效应的存在性, 研究弗勒斯特比的变化规律, 我们进行了混凝土试块循环单轴压缩试验.

需要指出的是, 具体实验过程中, 如何判断下次加载过程中是否已经有有效声发射产生, 以确定此时荷载的大小, 是测定弗勒斯特比的重要环节. 而关于有效声发射这一概念目前尚没有统一的定义, 不同的研究者都是根据自己的经验和所研究的介质采用相应的判别办法.

对于混凝土材料, 由于其自身结构的特点, 决定了其声发射过程具有特殊性.

实验观察表明, 在循环加载过程中, 偶尔会有片状的水泥浆体剥落, 由于这种局部剥落而产生的声发射会使声发射信号的幅度迅速加大, 但这种信号极为短暂, 因此不能作为恢复有效声发射的标志. 通过实验分析, 笔者认为, 对于混凝土材料可以用以下两个特征作为出现有效声发射的判别条件:

- (1) 当荷载增加时, 声发射信号是连续的, 即连续性准则;
- (2) 在荷载增加 10% 的过程中, 声发射事件计数多于 10 个, 即事件计数增加准则.

当这两个条件同时满足时, 便可认为已经恢复了有效声发射. 根据这两个判别标准, 对混凝土试块在循环往复单轴压缩时的声发射过程进行分析便可确定出每一加载循环中的前期荷载和后期恢复声发射的荷载, 进而可利用 1 式计算出弗勒斯特比. 图 2 为对于立方体试块相应的弗勒斯特比随相对应力水平 (即当前应力同试块的极限强度之比, $\%$) 变化的曲线.

图 3 为利用混凝土圆柱试块测得的弗勒斯特比同相对应力水平之间的关系曲线.

从图 2 和图 3 可以看出, 无论是立方体试块还是圆柱试块, 在往复压缩情况下, 声发射弗勒斯特比在不同应力水平上是不同的. 这说明 $FR(i)$ 是应力水平的函数, 并且都表现出这样的变化规律, 即随着相对应力水平的提高, 弗勒斯特比先是由大于 1 逐渐下降到小于 1 , 之

后又上升,并逐渐大于1,当相对应力水平超过70-80%时,弗勒斯特比急剧下降.因此,对于混凝土材料,FR(i)值随应力水平变化的过程,可以分为三个阶段,如图4所示.

(1) 相对应力水平 < 40% 时, FR(i)<1, 这说明在该范围内声发射过程并非完全可逆. 先是由大于1而下降并逐渐小于1,然后再上升. 这主要是由于混凝土属多相复合材料,在受到荷载作用之前,其内部已含有许多不同性质的缺陷、裂隙及微观构造上的不均匀性^[4],即便是在较低的应力作用下,低强度的微裂纹也会受压变形并产生开裂.

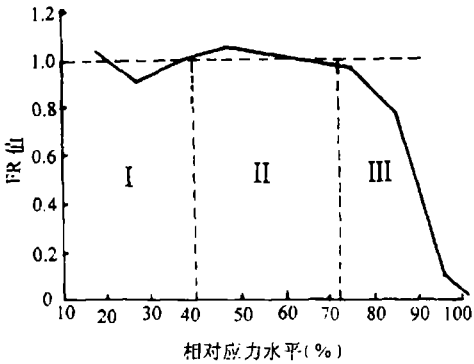


图4 混凝土材料弗勒斯特比随相对应力水平变化趋势

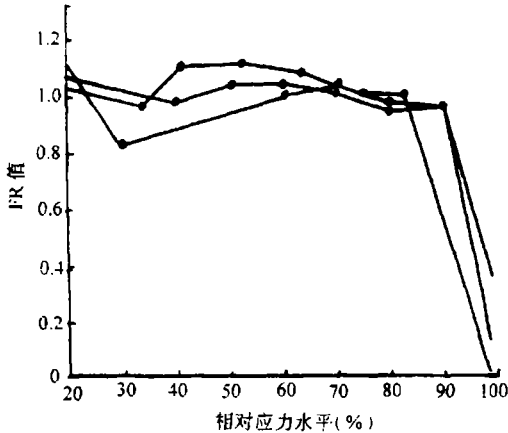


图2 混凝土立方体试块弗勒斯特比随相对应力水平变化曲线

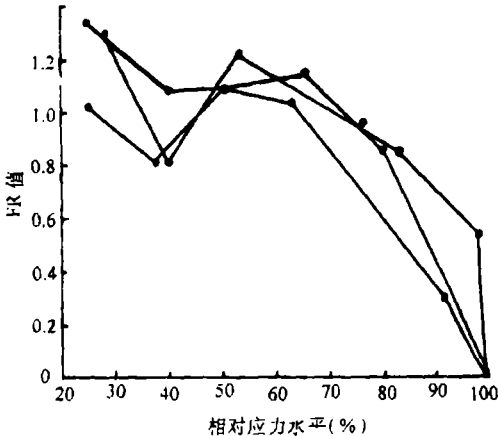


图3 混凝土圆柱试块弗勒斯特比随相对应力水平变化曲线

图5为混凝土试块在反复加载时测得的应力应变曲线^[5].

从本图可以看出,当加载到某一应力值后卸载,卸载后再重新加载,后一次的加载曲线同前一次的卸载曲线相交从而形成一封闭的滞回环,在较低的应力水平上,该滞回环所包围的面积随着应力水平的提高而逐渐缩小.这说明在低应力循环往复作用下,不同裂隙相继变形闭合,在微观上逐渐呈现出定向趋势,从无序趋向有序,在宏观上则逐渐呈现为更好的均匀性,也就是所谓的“锻炼效应”^[6].从而使得因反复加载而引起的内部能量的积蓄也逐渐减少,内部组织结构渐趋稳定.因此,FR(i)先是逐渐减小,后又逐渐增大.

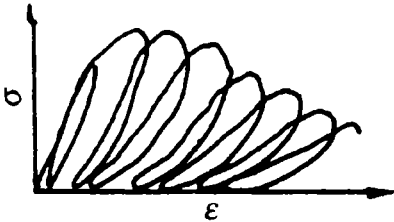


图5 混凝土试块在反复加载时测得的应力应变曲线^[5]

(2) 相对应力水平在 40-70% 范围内, FR(i)≥1, 这说明在该范围内声发射过程具有不可逆性,凯塞效应有效.文献^[7]分析指出,在该阶段内的声发射信号主要产生自裂纹的开

裂,此时,裂纹的开裂和扩展是稳定的,每次加载只有当应力强度因子超过材料的断裂初度时才会引起裂纹的扩展,所以,裂纹的扩展也具有不可逆性.声发射过程的不可逆性就是由裂纹扩展的不可逆性决定的.

(3) 相对应力水平超过 70-80% 后, $FR(i)$ 值迅速减小,声发射过程丧失不可逆性,凯塞效应失效.实验观察表明,此时混凝土内部的微裂纹扩展由随机转为集中,形成宏观裂纹并出现不稳定扩展.

从以上分析可以看出,对混凝土材料而言,其声发射凯塞效应不仅有应力上限,而且有应力下限.凯塞效应的有效范围大约只是在极限强度的 40-80% 之间.应力上限是由混凝土的破坏机制决定的,而应力下限则取决于混凝土自身结构的特点.

作为对比,我们还用砂浆试块(配合比为:水泥:砂:水 = 1:2.63:0.43) 在相同条件下进行了实验.图 6 为测得的弗勒斯特比与应力水平之间关系的实验结果.

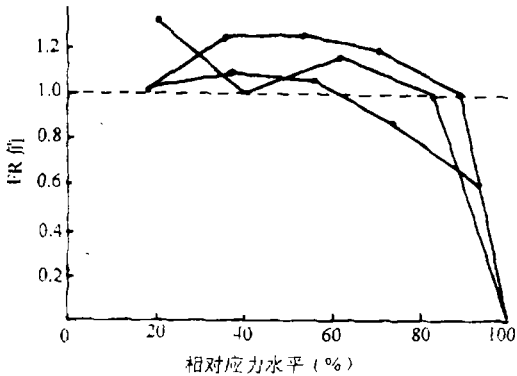


图 6 砂浆试块弗勒斯特比随
相对应力水平变化的实验曲线

由该图可以看出,砂浆试块的弗勒斯特比随着相对应力水平的提高基本呈单调下降的趋

势,当相对应力水平低于 70-80% 时, $FR(i) \geq 1$,这时凯塞效应严格有效.而当相对应力水平超过 70-80% 之后, $FR(i)$ 值锐减,声发射过程迅速失去不可逆性.因此,对于砂浆试块,其凯塞效应只有应力上限(大约为极限应力的 70-80%),而没有应力下限.这是因为砂浆体较混凝土而言有着更好的均匀性.

4 结论

通过实验及分析,得出以下几点结论:

(1) 混凝土材料的声发射过程在一定应力水平范围内具有不可逆性,即具有凯塞效应.

(2) 弗勒斯特比是对材料声发射过程不可逆程度的更详尽的描述.对混凝土材料而言,其声发射的不可逆程度同样因所达到的应力水平的不同而不同,即具有弗勒斯特效应.

(3) 从所得到的弗勒斯特比同应力水平之间的关系曲线可以清楚地看到,混凝土材料的凯塞效应不仅有应力上限(大约为极限应力的 70-80%),而且有应力下限(大约为极限应力的 30-40%).应力上限是由混凝土的破坏机制造成的,而应力下限则是由混凝土自身结构的特点决定的.

参 考 文 献

- [1] Rusch H. Zement-Kalk-Gips (Wiesbaden), 1959, 12(1):1-9.
- [2] McCabe et al. ACI Journal (73)1976.7:367-371.
- [3] Feeineis N, Anwendung der Schallemissionanalyse (SEA) als zerstörungsfreies Prüfverfahren für Beton, Dissertation TH Darmstadt (1982).
- [4] 尹双增. 断裂损伤理论及应用, 清华大学出版社, 1990.
- [5] 余天庆, 钱济成, 损伤理论及其应用, 国防工业出版社, 1993.
- [6] 鞠扬, 樊承谋. 土木工程学报, 1995, 6.
- [7] 纪洪广, 贾立宏, 李造鼎, 东北大学学报, 1995, 16(6)