

不同含水率砼单轴压缩下声发射与分形维数试验研究

蔡德明, 甘先永

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为研究水对砼破裂过程中声发射及分形规律的影响,选取养护 30 d 的 C35 砼,对干燥、自然、饱水条件下试件进行单轴压缩声发射试验,得到不同含水率下单轴压缩应力—应变曲线及声发射参数。结果表明,含水率的增加会使砼的塑性提高、强度降低;声发射参数可较好地反映岩石孔裂隙的产生过程,与岩石破坏过程中的内部细观结构演化规律具有直接关系;声发射计数随着含水率的增加呈下降趋势,水对岩样有软化、润滑作用,在裂纹产生过程中,水会削减剪切破坏、裂纹张开的激烈程度;不同含水率下试件的声发射计数的分形特征具有良好的相似性,其分形维数 D 呈现上升→突降→最大值→下降的特征。

关键词: 公路; 砼; 含水率; 分形; 声发射; 单轴压缩

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)03-0077-04

砼作为一种典型的脆性材料,其内部含有丰富的孔裂隙,在外力作用下,其中裂隙会发生闭合,当外载荷超过岩石强度时,会产生新的裂纹。当外载荷逐渐增大时,这些裂纹开始扩展、合并,并逐渐形成若干条宏观大裂缝,最后发生失稳破坏。期间,试件在破坏时由于能量的转化作用会逐渐释放出一种微小的声波,这种现象即为声发射。

砼在破坏过程中发生的声发射现象包含大量信息,由于人耳几乎无法侦测这类信号,需通过采用声发射系统进行监测、分析、处理。通过分析声发射的信号特征,可推演出砼内部孔裂隙结构演化,从而得出砼破坏失效机理。尽管声发射监测技术已有长足发展,但由于砼是一种复杂的混合材料,具有不均匀性、非连续性、多样性等特点及破坏过程中的不确定性,导致监测与判定缺乏定量评价标准,存在很大的人为主观因素。寻找一个能合理表征砼失效和破坏的参数,减少监测与判定对主观经验的依赖,对预防地下建筑大规模动力灾害具有切实意义。相关研究表明,砼具有良好的自相似性,可通过分形维数研究其相关问题。

关于砼的破坏特征,纪洪广等通过常规三轴压缩试验,揭示了砼在应力加载过程中的声发射特征及主破裂前兆信息;裴建良等进行砼试件在单轴压缩条件下声发射试验,得出了声发射试件空间分布的分维特征。但利用分形理论讨论不同含水率砼在应力加载过程中的声发射特征的研究相对较少。该文采用分形理论研究砼试件在破坏过程中的声发射

现象,用分形维数 D 定量描述砼在外载荷作用下逐渐破坏、最终失稳的过程,对比不同含水率条件下砼的破坏特征及声发射空间分布的分形维数 D 变化规律,分析含水率对砼破坏特征的影响。

1 试验过程

1.1 岩石试样的加工与制备

采用养护 30 d 的 C35 砼,用线切割机取出干燥状态、自然状态、饱和水状态下长方体试样各 3 个,编号分别为 GZ-1~3、ZR-1~3、BH-1~3,试样信息见表 1。

表 1 试样基本尺寸信息 mm

试样编号	长	宽	高
GZ-1	74.9	75.1	149.7
GZ-2	74.8	74.9	150.1
GZ-3	75.1	75.1	149.8
ZR-1	74.8	75.3	149.9
ZR-2	75.2	75.0	150.1
ZR-3	74.9	74.8	149.9
BH-1	75.1	75.0	149.8
BH-2	74.9	75.1	149.7
BH-3	75.0	75.1	149.9

1.2 试验设备与方法

声发射试验采用声发射系统和加载系统共同完成。加载系统采用英斯特朗三轴万能试验机,最大

轴压 3 000 kN,采用速率为 0.1 mm/min 的位移加载方式。采用 SAEU2S 声发射系统进行监测,采集间隔为 1 s。为保证声发射探头与试件充分接触,两者之间涂凡士林耦合,并用橡胶圈固定。

2 应力—应变曲线及声发射分析

2.1 应力—应变曲线分析

3 种含水率条件下应力—应变曲线通过万能试验机测得。表 2 为试样的强度、弹性模量测试结果。

表 2 试样基本参数测试结果

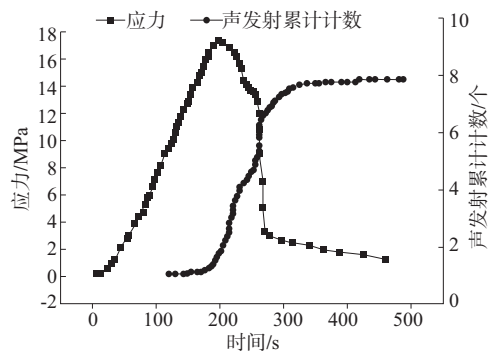
试样 编号	强度/ MPa	弹性模 量/GPa	试样 编号	强度/ MPa	弹性模 量/GPa
GZ-1	42.5	30.9	ZR-3	32.7	24.5
GZ-2	44.8	34.8	BH-1	26.2	18.6
GZ-3	43.1	32.8	BH-2	24.8	17.4
ZR-1	33.5	24.7	BH-3	24.3	19.4
ZR-2	34.6	25.3			

由表 2 可知:1) 水的存在会降低砼单轴抗压强度和弹性模量,使其在较低外载荷作用下便发生破坏。2) 产生同一应变,干燥状态所需轴压最大,饱和状态所需轴压最小。3) 随着含水率的提高,砼试样的弹性模量、单轴抗压强度都减小。砼的单轴抗压强度,自然状态比干燥状态减小 22.5%,饱和状态比干燥状态减小 42.1%;砼试样的弹性模量,自然状态比饱和状态增加 27.0%,干燥状态比饱和状态增加 78.4%。

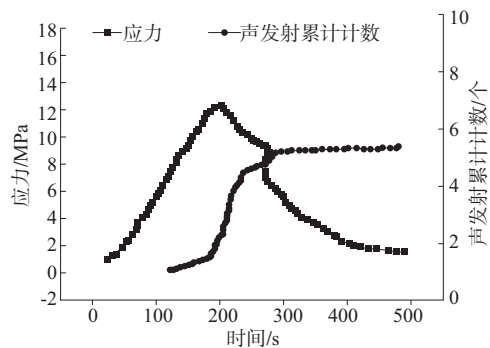
2.2 声发射数据分析

3 个不同状态试样(GZ-2、ZR-1、BH-1)在应力加载过程中的声发射标量(声发射计数)与时间的关系见图 1。

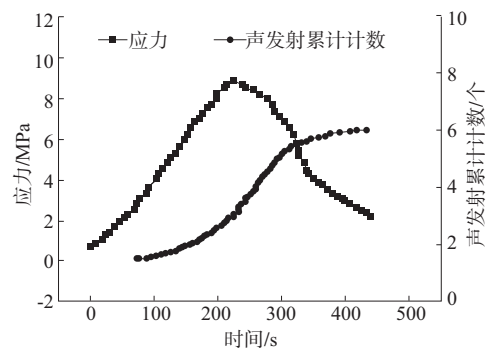
根据高保彬的研究结果,单轴条件下砼材料的破坏过程根据声发射的能量密集程度可划分为平静阶段(对应于应力—应变曲线的初始阶段,主要是因为原始孔裂隙的闭合)、活跃阶段(对应于应力—应变曲线的弹性阶段,主要是因为试样发生可恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形)和峰后平静阶段(对应于应力—应变曲线的峰后阶段,主要是因为破坏损伤程度逐渐减小)。当应力为峰值强度的 0~15%时,处于初始声发射平静期,这一过程中试样内部大量随机分布的孔裂隙被压实,而新的孔裂隙还未产生,故该阶段声发射现象很少。由图 1 可知:3 种含水率状态下砼破裂过程中的声发射变化规律基



(a) 干燥试样(GZ-2)



(b) 自然状态试样(ZR-1)



(c) 饱和水状态试样(BH-1)

图 1 不同含水率砼试样的声发射计数与时间的关系

本相同,且与之前的研究结果一致。不同含水率试样在初始阶段的声发射计数水平都很低,累计计数的增长也特别慢。之后随着应力的继续加载,由平静阶段进入活跃阶段,饱和、自然、干燥状态试样分别在 187、224、273 s 开始进入声发射活跃阶段(大约在抗压强度的 70%)。由于大量应变能的集聚,此时逐渐释放,并产生大量微裂隙和孔隙,在外力载荷作用下,这些孔裂隙扩展、合并,最终导致试样失稳破坏。因此,该阶段声发射计数开始急剧增长,并达到整个过程的最大值,声发射累计计数激增。载荷达到峰值应力后,开始由声发射活跃阶段进入峰后平静阶段。在该阶段,试样已充分破坏,且微裂缝

的产生和扩展并不存在。但在残余应力作用下,断裂裂缝之间由于摩擦作用还会产生一定的声发射事件。但与前两个阶段相比,其声发射计数大大减小,曲线的斜率也逐渐减小并基本保持水平不波动的形态。

对比 3 条不同状态下砂单轴压缩声发射曲线,含饱和水的砂在外载荷作用下发生的声发射现象比不含水的更少,即干燥状态下声发射最剧烈,自然状态下次之,饱和状态下最温和。其原因是水对于砂试样有软化、润滑作用,在裂纹产生过程中,水会削减剪切破坏、裂纹张开的激烈程度。

3 声发射计数分形特征分析

应用关联函数 $C(\epsilon)$ 给出关联函数的公式为:

$$D = -\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \lg C(\epsilon) / \lg \epsilon \quad (1)$$

式中: $C(\epsilon)$ 为系统的 1 个解序列,也称为相关整数。

以声发射计数序列为研究对象,每个声发射计数序列对应 1 个容量为 n 的序列集,再根据声发射计数序列集构成 1 个 m 维的相空间 ($m < n$)。后移再取 m 个数,以此类推构成 $N = n - m + 1$ 个向量,即:

$$X_N = \{x_{n-m+1}, x_{n-m+2}, \dots, x_n\} \quad (2)$$

定义关联函数为:

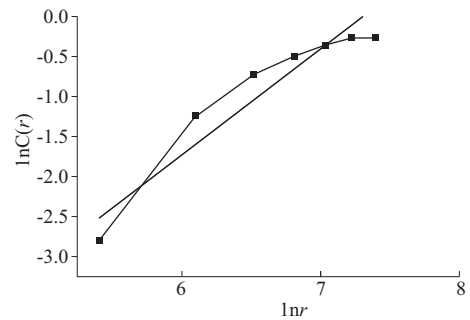
$$w(r(k)) = \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N h[r(k) - |X_i - X_j|] \quad (3)$$

式中: h 为 H 函数; $r(k)$ 为给定的尺度函数。

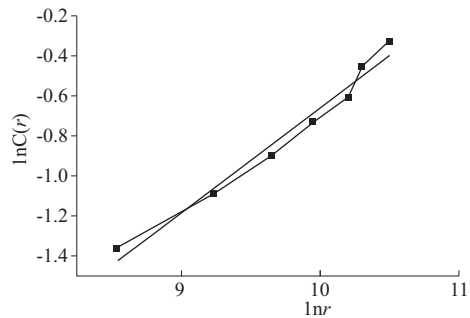
每个给定尺度 $r(k)$ 都对应着 1 个 $w(r(k))$ 。记 $w(r(k))$ 为 $W(k)$, 对于给定的 g 个尺度,在双对数坐标系中可得到 g 对坐标 $(\ln W(k), \ln r(k))$, 其中 $k = 1, 2, \dots, g$ 。对这 g 个坐标点进行一元线性回归,回归直线的斜率即为声发射参数的关联分形维数值 D 。图 2 为干燥、自然状态和饱和水状态砂试样在应力加载过程中声发射计数双对数关系。

从图 2 可看出:原始数据和拟合曲线具有较好的拟合度(相关性系数均大于 0.95),说明砂在应力加载过程中的声发射计数可通过分形维数理论来研究。

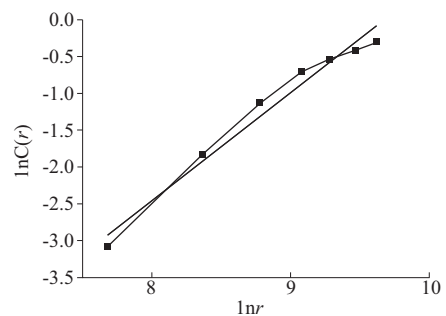
选用关联维数算法,结合数值分析软件,计算砂试样在饱和水状态、自然状态和干燥状态下声发射计数的分形维数 D 。不同含水率试样单轴压缩过程中分形维数 D 与时间的关系见图 3。



(a) 干燥试样(GZ-3)



(b) 自然状态试样(ZR-2)

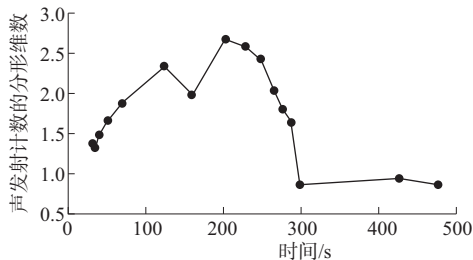


(c) 饱和状态试样(BH-3)

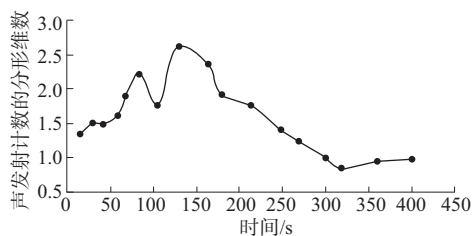
图 2 不同含水率状态砂试样声发射计数双对数关系

从图 3 可看出:在加载前期,原生孔裂隙开始闭合,相应的分形维数 D 较小,而由于原生孔裂隙尺寸多样性和空间分布的不均匀性,随着应力的逐渐加大,曲线经历一定波动;随着载荷的逐渐增大,次生孔裂隙逐渐增多,分形维数 D 急剧上升,且出现一个最大分形维数 D ,但在最大分形维数 D 出现之前会出现一个突降现象。其原因是前面过程所形成的裂缝面开始剪切滑移,剪切滑移所释放的应变能比之前的小,故声发射发生次数减少;随后孔裂隙继续产生,分形维数 D 随之增加到最大值;最后由于砂中产生大量裂隙,外载荷所施加的应力主要集中在这些孔裂隙周围,形成应力集中区,故最终该曲线呈现下降趋势。在现场进行地下土木建筑动力灾害预测时,可将砂试样破裂过程中的波动上升→突

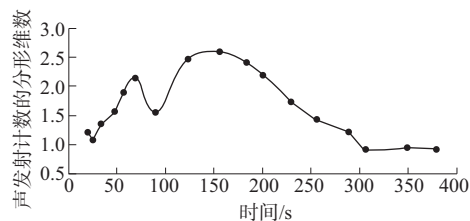
降→最大值→下降的声发射参数变化模式作为参考依据,若声发射计数分形维数经历上升、突降并达到最大值,则预示试样即将发生动态失稳破坏,应对涉及到砈工程中的建筑进行重点防御和监测,保证作业安全。



(a) 干燥试样(GZ-3)



(b) 自然状态试样(ZR-2)



(c) 饱和状态试样(BH-3)

图3 不同含水率状态砈试样声发射计数的分形维数与时间的关系

4 结论

(1) 随着含水率的增高,砈弹性模量、单轴抗压强度减小。砈试样的单轴抗压强度,自然状态比干燥状态减小22.5%,饱和状态比干燥状态减小42.1%;砈试样的弹性模量,自然状态比饱和状态增加27.0%,干燥状态比饱和状态增加78.4%。

(上接第71页)

- [5] 刘庆昌,王有志,安俊江,等.马尔科夫残差修正灰色理论模型在连续梁桥施工监控中的应用[J].中外公路,2017,37(5).
- [6] 王帅,邹静蓉,雷润杰,等.怀芷高速公路红砂岩路基填料改良试验研究[J].路基工程,2018(6).
- [7] 孙晓红,莫志兵,李斯洋.非等时距灰色模型在软土路

(2) 水对砈试样有软化、润滑作用,在裂纹产生过程中,水会削减剪切破坏、裂纹张开的激烈程度。

(3) 可将砈破裂过程中的声发射计数分形维数的波动上升→突降→最大值→下降的变化模式作为判定工程建筑失稳的参考依据,若分形维数经历上升、突降并达到最大值,则预示该砈试样即将发生破裂失稳。

(4) 砈破裂过程中的声发射计数具有良好的自相似性,可通过分形维数研究相关问题。

参考文献:

- [1] Leonard Obert, Wilbur Duvall. Use of subaudible noises for prediction of rock bursts[R]. United States Department of the Interior-Bureau of Mines, 1941.
- [2] 谢和平. 分形—岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] 冯增朝, 赵阳升, 文再明. 岩体裂隙面数量三维分形分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4).
- [4] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 岩石断裂和破碎的分形研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(4).
- [5] 夏元友, 吝曼卿, 廖璐璐, 等. 大尺寸试件岩爆试验碎屑分形特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(7).
- [6] 王利, 高谦. 岩石块度的分形演化模型及其应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(11).
- [7] 纪洪广, 卢翔. 常规三轴压缩下花岗岩声发射特征及其主破裂前兆信息研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4).
- [8] 裴建良, 刘建峰, 张茹, 等. 单轴压缩条件下花岗岩声发射事件空间分布的分维特征研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(6).
- [9] 高保彬, 李回贵, 李化敏, 等. 含水煤样破裂过程中的声发射及分形特性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(4).
- [10] 吴贤振, 刘祥鑫, 梁正, 等. 不同岩石破裂全过程的声发射序列分形特征试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 33(12).

收稿日期: 2019-09-20

基沉降预测中的应用[J]. 中外公路, 2010, 30(5).

- [8] 朱沙. 灰色 Verhulst 模型在高速公路路基沉降预测中的应用[J]. 公路与汽运, 2018(3).
- [9] 周俊磊, 杨成忠, 王景环, 等. GM(1,1) 预测模型在路基沉降中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(3).

收稿日期: 2019-10-03