

文章编号:1007-9629(2024)02-0153-08

基于声发射技术的早龄期混凝土断裂性能

范向前^{1,2,*}, 葛菲¹

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 水安全与水科学协同创新中心, 江苏 南京 210024)

摘要:为探究早龄期混凝土的断裂性能, 针对5种养护龄期(3、7、14、21、28 d)的混凝土试件, 开展20根含预制裂缝的三点弯曲梁断裂试验, 得到其荷载-裂缝口张开位移(P -CMOD)曲线. 基于该曲线, 计算得到早龄期混凝土的断裂韧度(起裂韧度和失稳韧度)和断裂能. 采用声发射(AE)技术, 通过振铃计数和累计振铃计数与时间的关系曲线, 探讨养护龄期对早龄期混凝土试件损伤断裂过程的影响; 通过计算上升角(RA)和平均频率(AF), 分析了早龄期混凝土的破坏模式. 结果表明: 早龄期混凝土的断裂韧度和断裂能均随着养护龄期的增加而增大, 抗开裂能力提高, 延性变差. 当养护龄期由3 d增至14 d时, 混凝土的断裂韧度和断裂能增速较快; 当养护龄期由14 d增至28 d时, 混凝土的断裂韧度和断裂能增速变缓. 振铃计数和累计振铃计数均能较好地反映早龄期混凝土的损伤破坏过程, 其中累计振铃计数的增速随着养护龄期的增加而减小. 混凝土的剪切裂缝占总裂缝的比例随着养护龄期的增加而增加.

关键词:早龄期混凝土; 裂缝; 断裂韧度; 断裂能; 声发射

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.02.008

Fracture Performance of Early-Age Concrete Based on Acoustic Emission Measurement

FAN Xiangqian^{1,2,*}, GE Fei¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Cooperative Innovation Center for Water Safety & Hydro Science, Nanjing 210024, China)

Abstract: In order to explore the fracture performance of early-age concrete, 20 three-point bending beam fracture tests with precast cracks were carried out for concrete specimens of 5 different curing ages (3, 7, 14, 21, 28 d) to obtain their load-crack mouth opening displacement (P -CMOD) curves. Based on these curves, the fracture toughness (crack initiation toughness and unstable toughness) and fracture energy of early-age concrete were calculated. The effect of the curing age on the damage fracture process of early-age concrete specimens was investigated by using the acoustic emission (AE) technique through the curves of ringing counts and cumulative ringing counts versus time. The failure mode of early-age concrete was analyzed by calculating the rise angle (RA) and average frequency (AF). The results show that the fracture toughness and fracture energy of early-age concrete increase with the increases of curing age, the cracking resistance improves and the ductility deteriorates. The growth rate of concrete fracture toughness and fracture energy are faster from 3 d to 14 d, while the growth rate of concrete fracture toughness and fracture energy are slower from 14 d to 28 d. Both ringing counts and cumulative ringing counts can reflect the damage

收稿日期: 2023-03-06; 修订日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52171270, 51879168); 国家自然科学基金委-区域创新发展联合基金重点资助项目(U23A20672); 黄河水科学研究联合基金资助项目(U2243223)

第一作者(通讯作者): 范向前(1982—), 男, 河南登封人, 南京水利科学研究院正高级工程师, 博士. E-mail: xqfan@nhri.cn

and failure process of concrete in early age. The growth rate of cumulative ringing counts decreases with the increases of curing age. The proportion of shear cracks to total cracks increases with the increases of curing age.

Key words: early-age concrete; crack; fracture toughness; fracture energy; acoustic emission(AE)

早龄期混凝土是指养护龄期小于标准养护龄期(28 d)的混凝土^[1].实际工程中,混凝土结构自浇筑成形后,在未达到标准养护龄期前便处于服役状态^[2].混凝土结构在养护龄期内受水泥水化^[3]、收缩变形^[4-5]和外荷载^[6]等影响,会产生裂缝而开裂,影响其耐久性和使用寿命.因此,为保证混凝土结构在早龄期阶段的安全性,开展早龄期混凝土的断裂特性研究具有重要意义.

Matallah等^[7]针对养护龄期不足1 d的混凝土试件,提出了软化损伤模型和非线性逆分析算法. Nikbin等^[8]将断裂能与不同有效参数进行联系,研究了1种确定混凝土断裂能的经验方法. Abolhasani等^[9]发现当水灰比由0.55降低到0.30时,混凝土的断裂韧性呈线性增加. 张廷毅等^[10]建立了多因素影响下混凝土断裂韧度的计算模型. 范向前等^[11]研究发现断裂韧度不随混凝土试件高度的增加而变化. 王治等^[12]研究认为7 d内混凝土的临界能量释放率随着养护龄期的增加而增长.

声发射(AE)技术^[13]是监测混凝土材料内部损伤动态过程的重要手段,其原理是根据材料内部发出的弹性波判断材料的损伤程度. Hu等^[14]通过AE参量得到了混凝土的断裂起裂点. Kravchuk等^[15]建立了基于神经网络的AE事件源机制分析方法. Han等^[16]基于AE信号,提出了胶粉混凝土安全区的严重性边界和历史指标边界. Chen等^[17]通过AE参数研究了不同加载速率下混凝土的断裂特征. 因此,AE技术不仅可以表征混凝土的断裂特性,也是监测混凝土内部损伤动态过程的重要手段.

当前,基于AE技术开展混凝土断裂特性的成果较多,但是针对早龄期混凝土断裂特性的研究相对较少. 为此,本文采用AE技术,对早龄期混凝土的断裂特性和破坏模式进行研究分析.

1 试验

1.1 原材料与试件制备

水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥;细骨料为天然河砂;粗骨料为粒径5~20 mm碎石;拌和水为自来水. 试件配合比 $m(\text{水泥}):m(\text{砂}):m(\text{石}):m(\text{水})=1.00:2.02:3.03:0.51$.

设计了5组养护龄期(3、7、14、21、28 d),每组4根,共20根含预制裂缝(缝高比为0.3)的早龄期混凝土

试件,强度等级为C40,尺寸为100 mm×100 mm×400 mm. 所有试件均一次性浇筑完成,并在浇筑时放置厚度为3 mm的预埋钢片,以形成初始缝高比为0.3的裂缝. 试件浇筑完成4 h后取出预埋钢片,24 h后脱模,标准养护至规定龄期.

1.2 试验方案

1.2.1 三点弯曲梁断裂试验

早龄期混凝土断裂试验在南京水利科学研究院液压伺服试验机上完成. 试件标准养护至规定龄期后,在其底部预制裂缝两侧粘贴钢片,钢片刀口处放置夹式引伸计,以测量混凝土加载过程中的裂缝口张开位移(CMOD)值. 试验单调加载采用位移控制,加载速率为0.05 mm/min. 为更加真实地反映试验结果,对试件进行4组重复试验. 早龄期混凝土试件尺寸示意图见图1.

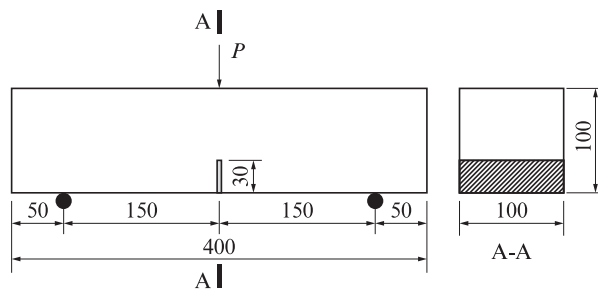


图1 早龄期混凝土试件尺寸示意图

Fig. 1 Dimensional diagram of early-age concrete specimen (size: mm)

1.2.2 AE采集系统

采用Sensor Highway II型AE采集系统动态检测试件的裂缝扩展情况. 该系统的滤波频率范围为1~400 kHz,前置增益设置值为40 dB,门槛值设置值为35 dB. 在试件前后同一水平处分别布置2个AE传感器,顶部同一高度处再布置2个AE传感器(共6个AE传感器). 在AE传感器与试件接触表面涂抹适量凡士林,并用专用设备固定AE传感器,以提高其精度.

1.3 断裂参数计算方法

1.3.1 断裂韧度

断裂韧度包括起裂韧度 K_{IC}^{ini} 和失稳韧度 K_{IC}^{un} . K_{IC}^{ini} 和 K_{IC}^{un} 能够体现混凝土的抗阻裂能力,是研究混凝土断裂性能的重要参数. 参考DL/T 5332—2005《水工混凝土断裂试验规程》,早龄期混凝土的 K_{IC}^{ini} 由起裂

荷载 P_{ini} 和初始裂缝长度 a_0 计算得到; K_{IC}^{un} 由失稳荷载 P_{max} 和临界有效裂缝长度 a_c 计算得到. a_c 的计算式为:

$$a_c = \frac{2}{\pi} (h + h_0) \arctan \left(\frac{bE_c V_c}{32.6P_{max}} - 0.1135 \right)^{1/2} - h_0 \quad (1)$$

其中

$$E_c = \frac{1}{bc_i} \left\{ 3.70 + 32.60 \tan^2 \left[\frac{\pi(a_0 + h_0)}{2(h + h_0)} \right] \right\} \quad (2)$$

式中: h_0 为夹式引伸计钢片厚度, mm; V_c 为试件裂缝口张开位移临界值, mm; E_c 为试件弹性模量, GPa; c_i 为试件初始柔度 (即 $CMOD/P$), mm/kN, 取 P - $CMOD$ 曲线上上升段线性直线上任意3点的 $CMOD$ 值, 与 P 值进行计算, 再取其平均值; b 为试件厚度, mm; h 为试件高度, mm.

1.3.2 断裂能

断裂能 G_F (N/m) 表示混凝土裂缝扩展单位面积所需要的能量, 用于反映混凝土抵抗裂缝扩展的能力. G_F 的计算式^[18]为:

$$G_F = \frac{W}{A_{tig}} \quad (3)$$

式中: W 为断裂过程中试件所做的功, J, 可用 P - $CMOD$ 曲线与坐标轴所围成的面积计算得到; A_{tig} 为试件断裂面的实际面积, m^2 , $A_{tig} = b(h - a_0)$.

试验过程中, 由于 P - $CMOD$ 曲线下降至荷载 P 为零时是难以实现的, 需要对 P - $CMOD$ 曲线尾部进行处理修正^[19]. 为此 Ulrikjaer 等^[20]提出取试验结束时的荷载 P_c 及对应的裂缝张口位移 $CMOD_c$ 与坐标轴

所围成的区域 (见图2阴影部分) 面积除以 A_{tig} , 得到混凝土的尾部断裂能. 因此, 早龄期混凝土的总断裂能为尾部断裂能与计算断裂能 (式(3)) 之和.

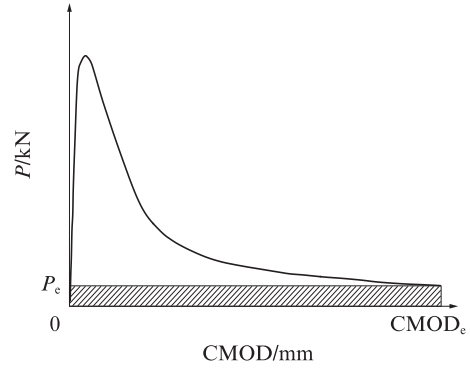


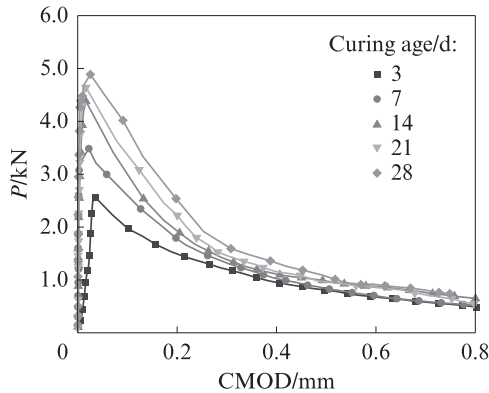
图2 早龄期混凝土的尾部断裂能计算示意图
Fig. 2 Schematic diagram of tail fracture energy calculation of early-age concrete

2 结果与讨论

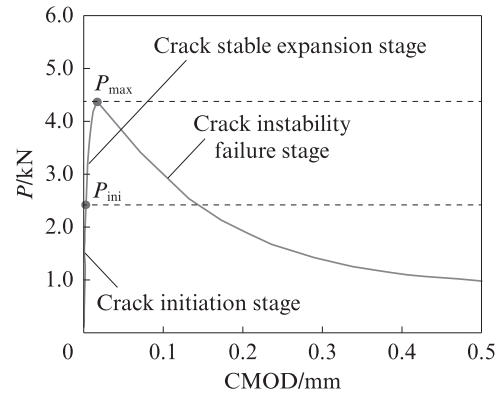
2.1 断裂性能

2.1.1 P - $CMOD$ 曲线

图3为早龄期混凝土的 P - $CMOD$ 曲线. 由图3可见: 早龄期混凝土的断裂破坏过程具有明显规律性, 可分为3个阶段——(1) 裂缝起裂阶段, P 随 $CMOD$ 值线性增加, 属于弹性阶段; (2) 裂缝稳定扩展阶段, 随着 $CMOD$ 值的增加, P 仍持续增加, 但增速逐渐变小, 直至达到失稳荷载 P_{max} , 同时伴随着微裂缝的产生; (3) 裂缝失稳破坏阶段, P 达到峰值后, 随着 $CMOD$ 值的增加逐渐减小, 混凝土内宏观裂纹发展成为贯穿裂纹.



(a) Change with curing age



(b) Fracture and failure process

图3 早龄期混凝土的 P - $CMOD$ 曲线

Fig. 3 P - $CMOD$ curves of early-age concretes

根据 P - $CMOD$ 曲线和相关公式, 计算出早龄期混凝土试件的起裂荷载、失稳荷载, 以及对应的断裂参数.

图4为早龄期混凝土起裂荷载和失稳荷载随养护龄期的变化. 由图4可见: 与3 d养护龄期相比, 7、14、21、28 d养护龄期下, 混凝土的起裂荷载提高

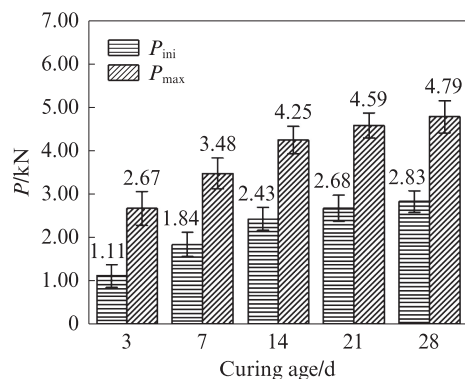


图4 早龄期混凝土的起裂荷载与失稳荷载随养护龄期的变化

Fig. 4 Variation of cracking load and instability load of early-age concretes with curing age

65.8%、118.9%、141.4% 和 455.0%；失稳荷载提高 30.3%、59.2%、71.9% 和 79.4%。这表明早龄期混凝土起裂荷载和失稳荷载均随着养护龄期的增加而增大。主要原因是随着养护龄期的增加，混凝土内部的水化产物能够填充孔隙和微裂纹^[1]，延缓了裂缝的产生和扩展，提高了混凝土的断裂性能。混凝土的延性由起裂荷载与失稳荷载的比值来反映，该比值越大，混凝土从起裂到失稳的过程就越快，延性就越差^[14,21]。图5为早龄期混凝土起裂荷载与失稳荷载的比值变化。由图5可见，随着养护龄期的增加，混凝土起裂荷载与失稳荷载的比值逐渐增大，表明混凝土延性变差。

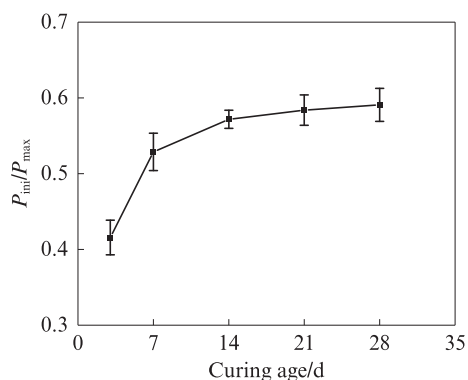


图5 早龄期混凝土起裂荷载与失稳荷载的比值变化

Fig. 5 Change in the ratio of cracking load to instability load of early-age concretes

2.1.2 断裂韧度

图6给出了早龄期混凝土起裂韧度和失稳韧度的变化规律。由图6可见：(1)与3 d养护龄期相比，养护龄期至28 d时，混凝土的起裂韧度与失稳韧度均显著增大，其抵抗开裂的能力不断提高；(2)与3 d养护龄期相比，7、14、21、28 d养护龄期下，试件的起裂韧度增加63.6%、115.0%、136.8% 和 149.8%，失稳韧度增加49.6%、79.5%、95.9% 和 104.3%。这表明

早龄期混凝土的起裂韧度和失稳韧度随着养护龄期的增加呈现相似的变化规律——当养护龄期由3 d增至14 d时，混凝土的起裂韧度和失稳韧度增速较快；当养护龄期由14 d增至28 d时，混凝土的起裂韧度和失稳韧度增速变缓。

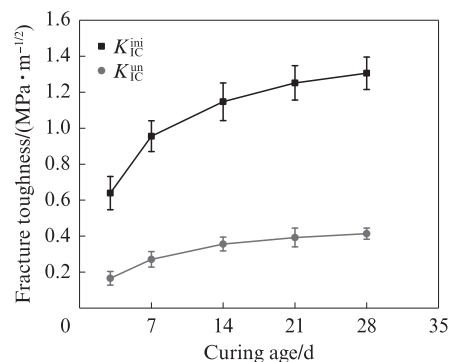


图6 早龄期混凝土的起裂韧度和失稳韧度

Fig. 6 Crack initiation toughness and unstable toughness of early-age concretes

2.1.3 断裂能

图7为早龄期混凝土的断裂能。由图7可见：随着养护龄期的增加，混凝土的断裂能不断增大，当养护龄期由3 d增至7 d时，混凝土断裂能增幅最大，当养护龄期由7 d增至14 d时，混凝土断裂能增幅次之；与3 d养护龄期相比，7、14、21、28 d养护龄期下，试件的断裂能增大16.4%、27.7%、33.8% 和 44.1%。这主要是养护龄期由3 d增至14 d时，混凝土的水化反应最为激烈，此期间水化产物的生成速率很快，不断填充混凝土内部孔隙，很大程度上提高了混凝土抗裂缝扩展能力；当养护至14 d龄期后，混凝土的水化进程逐渐减慢，基本不再产生新的水化产物，导致混凝土抵抗裂缝扩展的能力变弱。

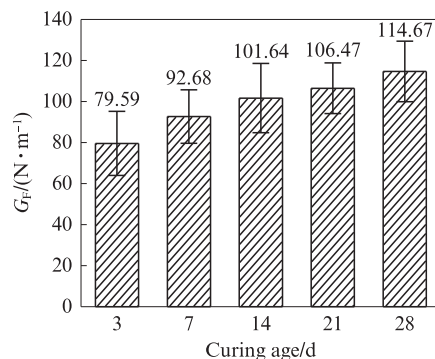


图7 早龄期混凝土的断裂能

Fig. 7 Fracture energy of early-age concretes

2.2 声发射参量

2.2.1 振铃计数

振铃计数是反映声发射现象是否活跃的参量，

从振铃计数的变化趋势可以得到材料内部损伤发展的剧烈程度和实时变化.累计振铃计数能够反映材料在加载过程中AE活动的总量和频率,其增速越快,材料内部损伤就越快.

图8给出了早龄期混凝土振铃计数和累计振铃计数与时间的关系曲线.由图8可知:(1)不同养护龄期条件下,混凝土的累计振铃计数与时间的关系曲线变化是一致的,可分为3个阶段,其中的2个拐点分别对应起裂荷载和失稳荷载.第一阶段累计振铃计数增长较快,混凝土内部出现损伤,开始产生微裂缝,为起裂阶段;第二阶段振铃计数明显减小,累计振铃计数的增速趋于平缓,说明此时混凝土内部

损伤稳定增长,裂缝正缓慢稳定发展,为稳定扩展阶段;第三阶段振铃计数突然激增,累计振铃计数近似于指数式增长,说明裂缝进入失稳扩展阶段,为失稳破坏阶段.(2)养护龄期对混凝土内部损伤有显著影响,养护龄期为3、7、14、21、28 d的试件累计振铃数分别为 1.28×10^3 、 3.25×10^3 、 4.33×10^3 、 4.71×10^3 、 5.13×10^3 ;与3 d养护龄期相比,7、14、21、28 d养护龄期下试件的累计振铃数分别增长153.4%、238.3%、267.9%和300.8%,表明随着养护龄期的增加,混凝土累计振铃计数的增速逐渐减小,原因是混凝土在养护期间发生了水化反应,水化产物的增加减小了混凝土内部的孔隙,增强了混凝土的抗开

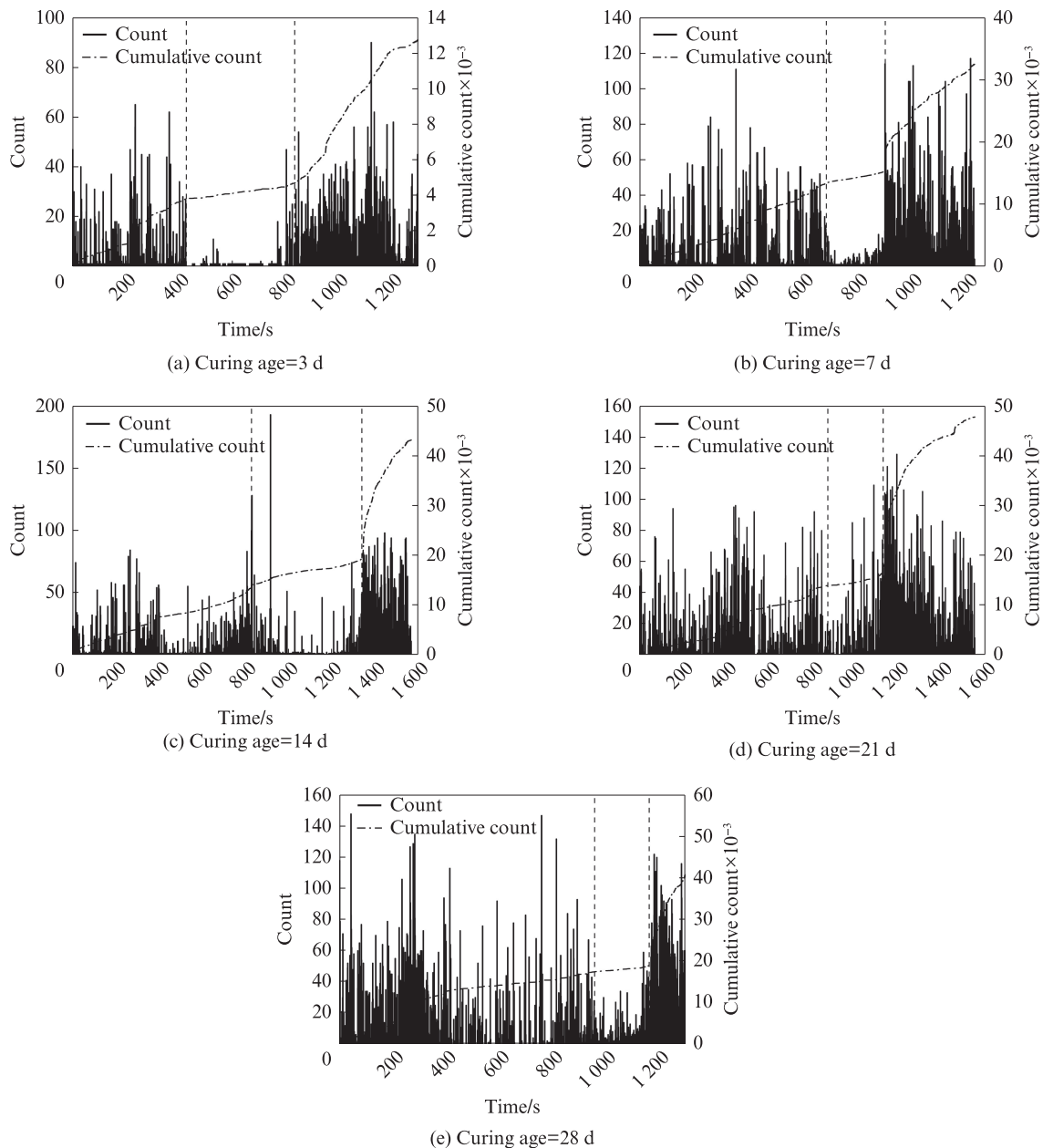


图8 早龄期混凝土振铃计数和累计振铃计数与时间的关系曲线

Fig. 8 Ringing count and cumulative ringing count with time of early-age concrete specimens at different curing ages

裂能力,从而使得混凝土内部的裂缝在扩展过程中AE信号增加.其中,养护龄期为14 d时,累计振铃计数增速更快,说明混凝土的水化反应更剧烈.

2.2.2 上升角(RA)值和平均频率(AF)值

混凝土断裂过程中的裂纹可分为剪切裂缝和拉伸裂缝.这2种裂缝产生的AE信号波形有所不同,剪切裂缝产生横波,拉伸裂缝产生纵波.由于横波和纵波的传播速度不同,因此可以用信号波的上升角(RA)和平均频率(AF)来识别混凝土断裂过程中的剪切裂缝和拉伸裂缝^[22-23].RA值是信号波上升时间与幅值的比值;AF值是振铃计数与持续时间的比值.若RA值高、AF值低,说明信号波形梯度小,AE

信号频率低,与剪切裂缝的特征信号相符合;反之,与拉伸裂缝的特征信号相符合.RA值高、AF值低对应混凝土剪切破坏模式;而RA值低、AF值高对应混凝土拉伸破坏模式.

图9为早龄期混凝土的RA-AF关系曲线.其中分界线上部分为拉伸破坏,下部分为剪切破坏.由图9可见:(1)随着养护龄期的增加,剪切信号源占总信号源的比例明显增多,表明剪切裂缝占总裂缝的比例随养护龄期的增加而增加.(2)养护龄期小于14 d时拉伸信号多于剪切信号,混凝土开裂以拉伸裂缝为主;养护龄期大于等于14 d时剪切信号多于拉伸信号,混凝土开裂以剪切裂缝为主.

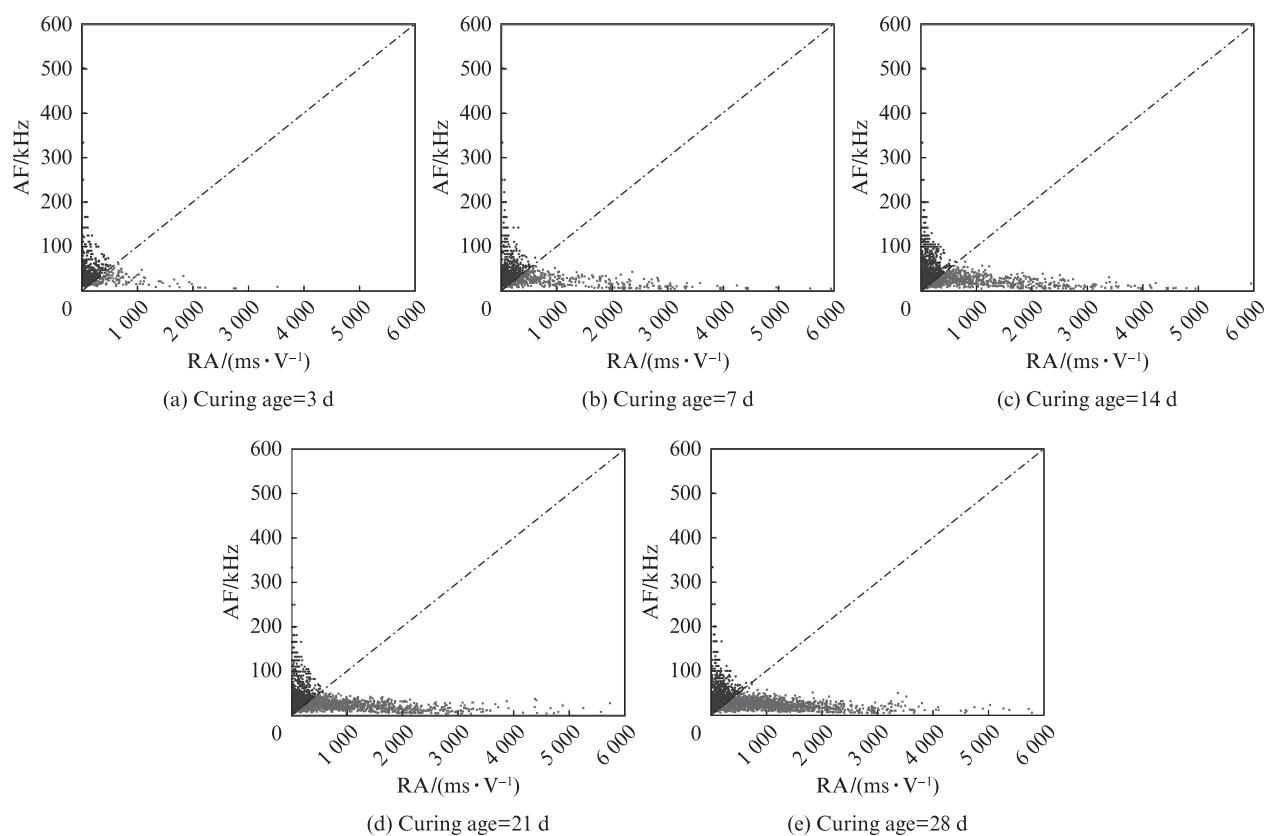


图9 早龄期混凝土RA-AF的关系曲线
Fig. 9 Relation curves of RA-AF of early-age concretes at different curing ages

3 结论

(1)早龄期混凝土的起裂荷载和失稳荷载随着养护龄期的增加而增大,起裂荷载与失稳荷载的比值随着养护龄期的增加而增大,混凝土延性变差.

(2)早龄期混凝土的起裂韧度、失稳韧度和断裂能随着养护龄期的增加而增大.与3 d养护龄期相比,7、14、21、28 d养护龄期下混凝土的起裂韧度增加63.6%、115.0%、136.8%和149.8%,失稳韧度增加49.6%、79.5%、95.9%、104.3%,断裂能增加16.4%、

27.7%、33.8%和44.1%.当养护龄期由3 d增至14 d时,早龄期混凝土的断裂韧度和断裂能增速较快;当养护龄期由14 d增至28 d,早龄期混凝土的断裂韧度和断裂能增速变缓.

(3)声发射振铃计数和累计振铃计数均能较好地反映早龄期混凝土的损伤破坏过程.与3 d养护龄期相比,7、14、21、28 d养护龄期下累计振铃数分别增长153.4%、238.3%、267.9%和300.8%,且累计振铃计数的增速随着养护龄期的增加而减小.

(4)早龄期混凝土断裂破坏过程中,剪切裂缝占

总裂缝的比例随着养护龄期的增加而增加.养护龄期小于14 d时,混凝土开裂以拉伸裂缝为主;养护龄期大于等于14 d时,混凝土开裂以剪切裂缝为主.

参考文献:

- [1] NEHDI M, SOLIMAN A M. Early-age properties of concrete: Overview of fundamental concepts and state-of-the-art research [J]. *Construction Materials*, 2011, 164(2):57-77.
- [2] 侯东伟, 张君. 早龄期混凝土全变形曲线的试验测量与分析[J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(5):613-619.
- HOU Dongwei, ZHANG Jun. Experimental measurement and analysis of overall deformation of concrete at early-age[J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(5):613-619. (in Chinese)
- [3] LAWRENCE A M, TIA M, FERRARO C C, et al. Effect of early age strength on cracking in mass concrete containing different supplementary cementitious materials: Experimental and finite-element investigation [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2012, 24(4):362-372.
- [4] MAO J W, LIANG N H, LIU X R, et al. Investigation on early-age cracking resistance of basalt-polypropylene fiber reinforced concrete in restrained ring tests[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 70:106155.
- [5] 陈波, 蔡跃波, 丁建彤, 等. 基于温度应力试验的早龄期混凝土弹性模量测量[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(4):785-790.
- CHEN Bo, CAI Yuebo, DING Jiantong, et al. Measurement of early age concrete elastic modulus based on thermal stress test[J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(4):785-790. (in Chinese)
- [6] 王世鸣, 李夕兵, 宫凤强, 等. 静载和动载下不同龄期混凝土力学特性的试验研究[J]. *工程力学*, 2013, 30(2):143-149.
- WANG Shiming, LI Xibing, GONG Fengqiang, et al. Experimental study on mechanical properties of concrete at different ages under static and dynamic load [J]. *Engineering Mechanics*, 2013, 30(2):143-149. (in Chinese)
- [7] MATALLAH M, FARAH M, GRONDIN F, et al. Size-independent fracture energy of concrete at very early ages by inverse analysis[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 109: 1-16.
- [8] NIKBIN I M, RAHIMI S, ALLAHYARI H. A new empirical formula for prediction of fracture energy of concrete based on the artificial neural network[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 186:466-482.
- [9] ABOLHASANI A, NAZARPOUR H, DEHESTANI M. The fracture behavior and microstructure of calcium aluminate cement concrete with various water-cement ratios [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2020, 109:102690.
- [10] 张廷毅, 高丹盈, 郑光和, 等. 三点弯曲下混凝土断裂韧度及影响因素[J]. *水利学报*, 2013, 44(5):601-607.
- ZHANG Tingyi, GAO Danying, ZHENG Guanghe, et al. Fracture toughness of concrete and influencing factors under three-point bending[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(5):601-607. (in Chinese)
- [11] 范向前, 胡少伟, 朱海堂, 等. 非标准钢筋混凝土三点弯曲梁双K断裂特性[J]. *建筑材料学报*, 2015, 18(5):733-736.
- FAN Xiangqian, HU Shaowei, ZHU Haitang, et al. Double-K fracture characteristics of three point bending beams of non-standard reinforced concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2015, 18(5):733-736. (in Chinese)
- [12] 王治, 金贤玉, 田野, 等. 基于双G准则的掺粉煤灰砼断裂性能研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2012, 39(3):17-22.
- WANG Zhi, JIN Xianyu, TIAN Ye, et al. Research on fracture characteristic of fly ash concrete based on dual-G criterion[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2012, 39(3): 17-22. (in Chinese)
- [13] LACIDOGNA G, PIANA G, CARPINTERI A. Damage monitoring of three-point bending concrete specimens by acoustic emission and natural frequency analysis[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 210:203-211.
- [14] HU S W, LU J, XIAO F P. Evaluation of concrete fracture procedure based on acoustic emission parameters[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47:1249-1256.
- [15] KRAVCHUK R, LANDIS E N. Acoustic emission-based classification of energy dissipation mechanisms during fracture of fiber-reinforced ultra-high-performance concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176, 531-538.
- [16] HAN Q H, YANG G, XU J, et al. Acoustic emission data analyses based on crumb rubber concrete beam bending tests[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 210:189-202.
- [17] CHEN C, FAN X Q, CHEN X D. Experimental investigation of concrete fracture behavior with different loading rates based on acoustic emission[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237:117472.
- [18] 张秀芳, 徐世烺. 采用荷载-裂缝张开位移曲线确定混凝土三点弯曲梁的断裂能[J]. *水利学报*, 2008, 39(6):714-719.
- ZHANG Xiufang, XU Shilang. Determination of fracture energy of three-point bending concrete beam using relationship between load and crack-mouth opening displacement [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(6):714-719. (in Chinese)
- [19] 徐慧颖, 卜静武, 吴新宇. 不同缝高比大坝混凝土断裂性能及声发射特性[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(3):100-104.
- XU Huiying, BU Jingwu, WU Xinyu. Fracture performance and acoustic emission characteristics of dam concrete with different crack-depth ratios[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(3): 100-104. (in Chinese)
- [20] ULFKJAER J P, KRENK S, BRINCKER R. Analytical model for fictitious crack propagation in concrete beams[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1995, 121(1):7-15.
- [21] 张志刚, 尹志伟, 秦凤江. 低模量早强型高延性混凝土的力学行为[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(5):707-713.
- ZHANG Zhigang, YIN Zhiwei, QIN Fengjiang. Mechanical performance of engineered cementitious composites(ECC) with low modulus and early strength[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(5):707-713. (in Chinese)
- [22] YANG L Y, XIE H Z, ZHANG D B, et al. Acoustic emission characteristics and crack resistance of basalt fiber reinforced

- concrete under tensile load [J]. Construction and Building Materials, 2021, 312:125442.
- [23] 陈徐东, 黄业博, 陈晨. 橡胶自密实混凝土断裂性能及声发射特征[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):758-765.
- CHEN Xudong, HUANG Yebo, CHEN Chen. Fracture properties and acoustic emission characteristics of rubber self-compacting concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):758-765. (in Chinese)

(上接第 152 页)

- SUN Zhenping, MU Fanyuan, KANG Wang, et al. ^1H low-field NMR relaxation characteristics of evaporable water in hydroxyethyl methyl cellulose ether modified calcium sulfoaluminate cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(8):1109-1115. (in Chinese)
- [21] 王茹, 周袁宇, 刘校荣, 等. 羟丙基甲基纤维素对硫铝酸盐水泥水化的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(5):538-546.
- WANG Ru, ZHOU Yuanyu, LIU Xiaorong, et al. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose on hydration of calcium sulfoaluminate cement[J]. Journal of Building Materials, 2022, 26(5):538-546. (in Chinese)
- [22] 王茹, 刘科, 万芹, 等. 含羟乙基纤维素醚对 CSA 水泥早期水化的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8):836-842.
- WANG Ru, LIU Ke, WAN Qin, et al. Effect of cellulose ethers with hydroxyethyl group on early hydration of CSA cement [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(8):836-842. (in Chinese)
- [23] LI J, WANG R, XU Y. Influence of cellulose ethers chemistry and substitution degree on the setting and early-stage hydration of calcium sulphoaluminate cement[J]. Construction and Building Materials, 2022, 344:128266.
- [24] 欧志华, 马保国, 蹇守卫. 非离子纤维素醚改性水泥浆的孔结构[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1):121-126, 137.
- OU Zhihua, MA Baoguo, JIAN Shouwei. Pore structure of cement pastes modified by non-ionic cellulose ethers[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1):121-126, 137. (in Chinese)
- [25] MCMULLEN R L, OZKAN S, GILLECE T. Physicochemical properties of cellulose ethers[J]. Cosmetics, 2022, 9(3):52-72.
- [26] WAN Q, WANG Z J, HUANG T Y, et al. Water retention mechanism of cellulose ethers in calcium sulfoaluminate cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301:124118.