

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221459

基于声发射事件数的水工混凝土损伤率效应研究

陈 乾, 贾易横, 陈庆华, 卜静武, 徐 波

(扬州大学水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要: 为研究加载速率对水工混凝土损伤演化特性的影响,对两种尺寸的带缺口水工混凝土立方体试件(边长为 300、450 mm)进行不同加载速率(0.1、0.01、0.001 mm/s)下楔入劈拉试验,并采用声发射技术监测混凝土在破坏过程中的声发射信号。结果表明,在混凝土破坏过程中声发射事件率的变化可分为平静期、活跃期和衰减期,且随加载速率降低,活跃期增长。根据声发射事件数定义的损伤变量将水工混凝土的损伤过程分为裂缝萌生阶段、裂缝加速扩展阶段和破坏阶段三个阶段。加载速率越小,损伤第二阶段增长速率越快。基于声发射事件数建立的损伤演化模型服从 Weibull 分布,该模型能较好地反映混凝土在不同加载速率下的损伤演化特征。

关键词: 水工混凝土; 加载速率; 声发射; 损伤; Weibull 分布

中图分类号: TV331; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0180-04

1 引言

水工混凝土结构在服役过程中除了受结构自重、水压力等静荷载作用外,还会受到地震荷载、波浪荷载等动荷载作用,因此研究不同加载速率下大坝混凝土的损伤特性具有重要的工程实际意义。目前,大多是根据混凝土的宏观力学参数分析开裂、位移等表面损伤情况^[1-3],而缺少对混凝土内部损伤的研究。声发射技术为一种无损检测方法,常应用于混凝土、岩石等材料的损伤研究,如 CHEN D 等^[4]利用声发射三维定位确定了混凝土裂缝的主要位置;CHEN CHEN 等^[5]发现混凝土的延性随加载速率的增大而减小,并利用声发射技术得出 AE 累积能量可反映不同加载速率下混凝土试件断裂能的变化;刘妙燕等^[6]利用声发射累计能量定义了损伤变量,并基于损伤参数分析了混凝土断裂能的变化规律;BING C 等^[7]对不同缝高比的混凝土梁进行三点弯曲试验,发现混凝土试件缝高比对声发射事件数影响显著,且 Weibull 模型能反映相对缺口深度对混凝土声发射特性、断裂特性和脆性的影响规律。上述研

究表明混凝土声发射参数能反映混凝土损伤,但就声发射事件数能否准确地反映混凝土的损伤机理目前还未得到一致的结论。因此有必要进一步深入研究混凝土的声发射事件数发展规律,并基于声发射事件数建立混凝土损伤演化模型,揭示混凝土损伤演化机理。本文通过开展不同加载速率下水工混凝土楔入劈拉试验,分析了加载速率对混凝土声发射试件的影响规律,并基于声发射事件数建立了 Weibull 损伤模型,获得了一些有益的结论,可供借鉴。

2 试验方案

2.1 试验材料

试验用水采用自来水,水泥为 P. O 42.5 级水泥,将二级粉煤灰作为掺合料,砂子为级配良好的河沙,粗骨料选用花岗岩碎石,最大粒径为 120 mm。为提高混凝土流动性,加入聚羧酸高效减水剂,配合比见表 1。

按照混凝土配合比分别搅拌编号为 WS1、WS2 的混凝土拌和物,将搅拌好的混凝土拌和物分别浇筑到边长为 300、450 mm 的立方体试模

收稿日期: 2022-07-15, **修回日期:** 2022-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809227, 52079120)

作者简介: 陈乾(1999-),男,硕士研究生,研究方向为水工混凝土静动态力学特性, E-mail: 1057266095@qq.com

通讯作者: 卜静武(1988-),女,博士、讲师、硕导,研究方向为水工混凝土静动态力学特性, E-mail: bujingwu2008@

中。成型 24 h 后拆模,并在养护室内养护至 28 d 龄期。分别用 WS1-1、WS1-2、WS1-3 对应加载速率为 0.1、0.01、0.001 mm/s 的 300 mm 的尺寸试件,WS2-1、WS2-2、WS2-3 对应加载速率为 0.1、0.01、0.001 mm/s 的 450 mm 的尺寸试件。

表 1 水工混凝土配合比

Tab. 1 Hydraulic concrete mix kg/m³

编号	水	水泥	砂	粉煤灰	石子				减水剂
					小石	中石	大石	特大石	
WS1	138.00	210.00	711.00	90.00	375.00	375.00	500.00	6.27	
WS2	115.00	150.80	591.00	81.20	400.00	320.00	400.00	180.00	2.66

2.2 楔入劈拉试验

根据《水工混凝土断裂试验规程》^[8]开展楔入劈拉试验,使用如图 1 装置加载,为消除垂直荷载

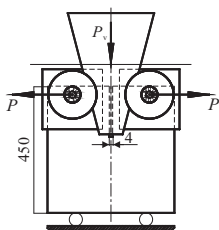


图 1 楔入劈拉示意图

Fig. 1 Wedge and split drawing diagram

对试件产生的弯矩和试件的自重,在试件的四分点上采用两根钢筋作为支撑,与夹具传到试件上的竖向荷载 P_v 位于同一条直线上。轴承和钢轴可将垂直力转化为水平荷载 P 作用在传力板上。因此,作用在试件上的劈拉荷载 P 与施加的竖向荷载 P_v 之间的关系为:

$$P = P_v / (2 \tan \alpha) \quad (1)$$

式中, α 为楔形角,取 15° 。

为获得完整的试件破坏过程中声发射参数,以裂缝口张开位移(CMOD)控制加载过程,并开展 0.1、0.01、0.001 mm/s 三种不同加载速率的试验。

2.3 声发射试验

使用美国物理声学公司生产的 Sensor Highway II 8 通道采集系统采集声发射,在试件两侧各安装两个声发射传感器,且不在同一水平线上,见图 2。布设声发射传感器之前在试件与传感器表面涂适量凡士林,并用胶带将传感器固定在试件上。设置门槛值为 35 dB,前置增益为 35 dB,滤波频率为 1~60 kHz。

3 试验结果与分析

3.1 声发射三维定位

声发射(AE)是材料或结构在外力作用下产生变形或损伤的同时,以弹性波形式释放出应变

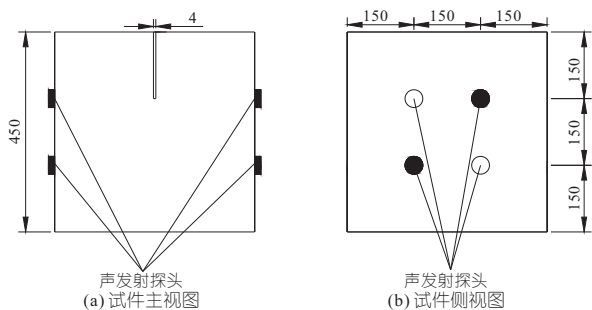


图 2 声发射探头布置图(单位:mm)

Fig. 2 Layout of acoustic emission probe

能的一种自然现象。在混凝土加载试验过程中,材料内部一旦产生裂缝,即可通过声发射探头测试到相应的声波,称为一次声发射事件。由于声波是时间和空间的函数,因此通过弹性波传到传感器的时间、传播速度等参数即能对声发射源位置进行三维定位,从而直观地反映材料内部裂缝产生的位置。根据试件的形状,对试件设置三维坐标系,根据声发射源三维定位技术得到的三种加载速率下 300 mm 尺寸的水工混凝土试件完全断裂时的声发射信号见图 3。由图 3 可看出,加载速率越大,所采集的信息数就越少,说明加载速率大,事件内部裂隙发展不充分,裂缝数量少。当加载速率分别为 0.1、0.01、0.001 mm/s 时声发射源在 XOZ 平面上所占的宽度分别约为 105、140、170 mm。结果表明,加载速率越大声发射越集中,而加载速率越小声发射越分散,主裂缝两侧的次生裂缝扩展充分,裂缝宽度较大。在裂缝张口处声发射源较集中,距离原始裂缝越远,声发射源信息越分散。

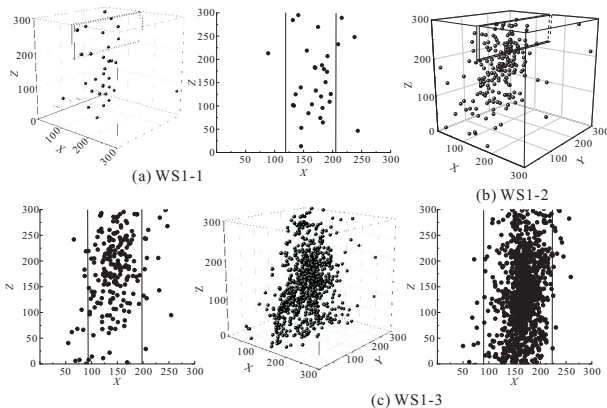


图 3 声发射三维位置源信息和声发射源在 XZ 平面投影

Fig. 3 Acoustic emission three-dimensional source information and AE source projected on the XZ plane

3.2 声发射事件数

声发射事件数的累积速率和总量能够定量反映材料内部裂纹总体扩展情况,因此,分析试验过程中声发射事件率及累计声发射事件数随 CMOD 的变化过程,声发射事件率定义试件每扩

展单位长度的裂缝口张开位移 CMOD 所产生的声发射试件数,见图 4。由图 4 可看出,不同加载速率下两种尺寸的混凝土试件的声发射事件率变化具有三阶段特征,即平静期—活跃期—衰减期。在峰值荷载前 (oa 段),声发射事件数相对较少,累计声发射事件数曲线增长较缓,声发射信号较平静。此时试件内部的裂纹主要是一些分散的微裂纹,内部损伤主要以原生裂隙为主,因此声发射事件强度低。在此阶段,加载速率越大,声发射事件数越少,这是因为加载速率较快时试件内部裂缝来不及扩展,因此声发射信号较少;另一方面,声发射信号采集具有滞后性,加载速率较快时,峰前阶段产生的声发射信号还未来得及采集即进入试件峰后破坏阶段。超过峰值荷载后,声发射信号突然变得活跃,累计声发射事件数曲线的斜率明显增加,为活跃期(ab 段)。峰前阶段混凝土内部积聚了大量的弹性应变能在进入峰后阶段时开始快速释放,大量的微裂纹开始迅速扩展,聚合为宏观裂缝,因此声发射事件数迅速增加。在此阶段试件内部损伤快速发展,产生明显的主裂缝。同时,随加载速率的减小,试件的整体活跃期增长。这是由于加载速率减小,试件的受载时间会变长,试件内部的裂隙能够得到充分发展,声发射越活跃。活跃期后试件内部的损伤已到达很高的水平,试件所能承受的荷载快速衰减,声发射事件率也快速衰减,累计声发射事件数曲线的斜率也在减小,趋于平缓,所以此阶段称为衰减期(bc

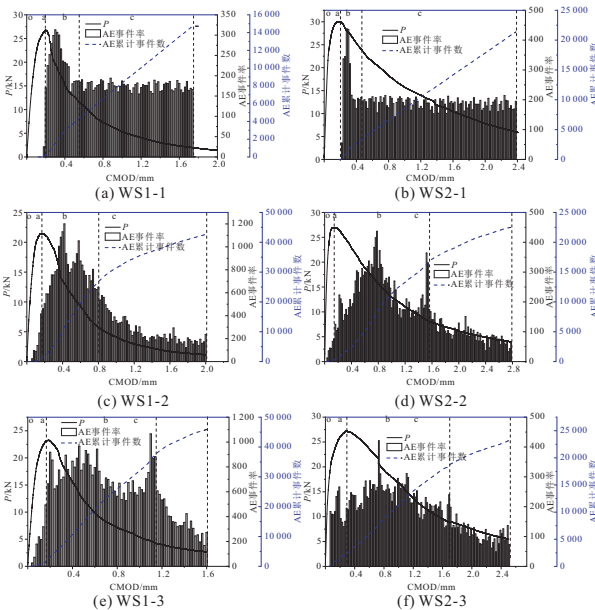


图 4 不同加载速率下荷载、事件率和累计事件数随 CMOD 的变化

Fig. 4 Load, event rate and cumulative event number change with CMOD at different loading rates

段)。这一阶段声发射事件数维持在相对比较低的水平,这是由于主裂缝在第二个时期发展已比较完全,形成了稳定的主裂缝,在低应力水平下,试件沿主裂缝继续稳定扩展,但扩展的速度会明显降低,因此声发射信号强度降低,直至试件完全破坏。因此,声发射事件数可反映混凝土材料的破坏过程。

4 损伤分析

4.1 损伤参数

混凝土可认为是由大量的细观单元组成的,在外力荷载作用下,这些单元会发生破坏,从而产生声发射,因此声发射事件数可从细观层面反映混凝土的损伤程度。当混凝土材料、试件尺寸及加载方式一定时,其破坏过程中产生的声发射事件数总量是一定的,因此用声发射累计事件数与试件破坏时的声发射事件总数之比定义混凝土的损伤 D_{AE} [9]:

$$D_{AE} = N_{CMOD} / N_{tot} \quad (2)$$

式中, N_{CMOD} 为与 CMOD 对应的声发射累积事件数; N_{tot} 为试件破坏时的累计声发射事件数。

根据式(2)计算得到不同加载速率楔入劈拉荷载下混凝土试件的损伤演化过程,见图 5。从整体来看,两种尺寸的混凝土试件的损伤变量随 CMOD 的演化过程均可分为三个阶段:①第一个阶段为损伤缓慢增长阶段($D < 0.1$),试件内部仅产生少量微裂缝及一些原生裂缝,裂缝扩展不充分,损伤处于相对较低的水平,与图 3 中声发射信号平静期相对应。②第二个阶段为损伤快速增长阶段($0.1 < D < 0.8$),试件内部有大量裂缝生成。第二阶段结束后试件的损伤超过 0.8,在此阶段试件的内部微裂缝快速增加,沿着切缝处发展聚合成为主裂缝。③第三个阶段为损伤稳定发展阶段($D > 0.8$),这一阶段试件的主裂缝继续扩展,但裂缝扩展速率明显下降,损伤演化趋于稳定,直至试件完全破坏。另外,加载速率对试件的损伤演化过程也有明显的影响。加载速率越慢,试件

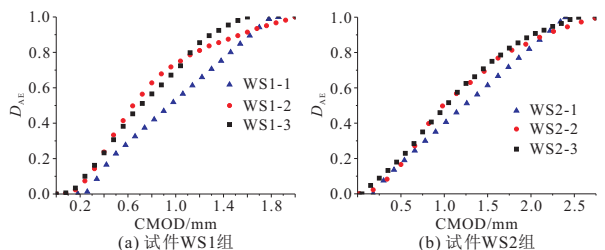


图 5 混凝土损伤演化过程

Fig. 5 Damage evolution of concrete

内部裂缝扩展越充分,损伤速度越快,尤其是在第二阶段。由此说明,基于声发射事件数定义的损伤变量可很好地反映混凝土的损伤演化规律及效应。

4.2 损伤模型

根据脆性材料统计损伤理论,在外力作用下,组成混凝土的细观单元的破裂概率 $f(\delta)$ 通常符合 Weibull 分布^[4]:

$$f(\delta) = \theta m (\delta - \delta_0)^{m-1} \quad (3)$$

式中, δ 为细观单元的变形; θ 为尺度参数; m 为形状参数; δ_0 为位置参数。

当试件的变形达到某一定值时,试件内细观单元的破坏概率 $F(\delta)$ 为:

$$F(\delta) = \int_0^\delta f(\delta) = 1 - \exp[-\theta(\delta - \delta_0)^m] \quad (4)$$

由于声发射事件的发生是由细观单元的破裂引起的,因此当变形达到某一确定数值时,细观单元的破碎概率可表示为变形到达某一数值之前的累计声发射事件数 (N_{CMOD}) 与试件完全破坏时总的声发射事件数 (N_{tot}) 的比值,即:

$$D = N_{\text{CMOD}}/N_{\text{tot}} = 1 - \exp[-\theta(\delta - \delta_0)^m] \quad (5)$$

根据式(5),对 6 组试验结果进行了拟合,结果见图 6。由图 6 可看出,模拟结果与试验结果吻合度较高,拟合度超过 0.98,说明 Weibull 分布能够较准确地反映水工混凝土损伤演化的三阶段过程,即缓慢—加速—平稳增长。模型参数 θ 、 m 、 δ_0 见表 2。由表 2 可看出,随加载速率减小, θ 值逐渐增大, δ_0 逐渐减小,而 m 则不受加载速率的影响。三参数 Weibull 模型中,随 θ 值的增大,曲线从平缓的累积曲线逐渐向三阶段累积曲线变

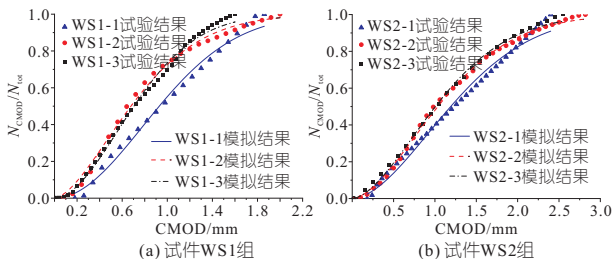


图 6 不同加载速率下试件的损伤模型曲线

Fig. 6 Damage model curves of specimens under different loading rates

表 2 Weibull 模型参数

Tab. 2 Parameters of Weibull model

试件 编号	加载速率 /(mm · s ⁻¹)	几何 参数 θ	形状 参数 m	位置 参数 δ_0	R^2
WS1-1	0.1	0.82	1.94	0.04	0.987
WS1-2	0.01	1.23	1.43	0.03	0.995
WS1-3	0.001	1.35	1.82	0.02	0.995
WS2-1	0.1	0.53	1.74	0.02	0.986
WS2-2	0.01	0.67	1.64	0.01	0.998
WS2-3	0.001	0.72	1.65	0.02	0.997

化。说明加载速率越小,损伤曲线越趋向于三阶段发展趋势,第一、三阶段增长速率较缓慢,损伤主要集中在第二阶段,第二阶段的损伤累积速率较快,损伤模型曲线的发展与混凝土实际的损伤过程相一致。而两种试件相比,对大尺寸试件试验结果进行拟合得到几何参数 θ 值比小尺寸试件拟合参数 θ 值小,说明大尺寸试件破坏过程损伤累积较平缓,而小尺寸试件损伤累积三阶段特征更明显。这是由于大尺寸试件的骨料粒径更大,骨料的互锁效应更明显,能够起到抑制裂缝发展的作用。位置参数 δ_0 随加载速率降低呈现出逐渐减小的趋势,说明加载速率越小,产生损伤的起始变形越小,这是因为加载速率越小,材料内部裂缝扩展越充分。而加载速率较快时,裂缝来不及扩展,且扩展不充分,当采集到明显的声发射信号时,已经产生比较大的变形,即产生起始损伤的变形越大。

5 结论

a. 从声发射三维定位信息可知,加载速率越大,声发射信号越少,且越集中于主裂缝,加载速率越小,声发射信号越多,且越分散,主裂缝两侧次生裂缝较多。

b. 在混凝土试件破坏过程中,声发射信号可分为平静期、活跃期和衰减期,且加载速率越小,活跃期越长。

c. 根据声发射事件数定义的损伤变量将混凝土的破坏分为三个阶段,即裂缝萌生阶段、裂缝加速扩展阶段及破坏阶段。加载速率越小,损伤变量的增长速率越快。

d. 基于声发射事件数建立的大坝混凝土损伤模型服从 Weibull 分布,该模型对混凝土损伤演化过程模拟效果较好,同时也能够反映加载速率对损伤演化过程的影响。加载速率越小, θ 值越大,而 δ_0 越小,说明随加载速率的降低,混凝土损伤演化过程越趋向于三阶段发展过程,第二阶段损伤速率更快,而产生起始损伤的变形越小。

参考文献:

- [1] 王乾峰,姜袁,马莉,等. 考虑应变率效应的混凝土损伤特性试验研究[J]. 混凝土, 2010(7): 48-50,53.
- [2] SUKONTASUKKUL P, NIMITYONGSKUL P, MINDESS S. Effect of loading rate on damage of concrete[J]. Cement and concrete research, 2004, 34(11): 2127-2134.

31(9):131-134.

[5] 刘菁钰, 彭文哲, 赵明华. 边坡稳定性分析的简化计算方法[J]. 公路工程, 2022, 47(5): 55-62.

[6] 叶帅华, 章瑞环, 袁中夏. 边坡稳定性分析及滑移面快速确定[J]. 地震工程学报, 2021, 43(6): 1361-1367.

[7] 孙吉书, 夏健超, 王建平, 等. 相关向量机模型在

边坡稳定性预测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(28): 12234-12242.

[8] 张华, 练继建, 李会平. 挑流水舌的水滴随机喷溅数学模型[J]. 水利学报, 2003, 34(8): 21-25.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑边坡工程技术规范:GB 50330-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

Study on Combined Support of Anchor Cable and Frame Lattice Beam on Slope of A Hydropower Station

LIU Yu-xing^{1,2}

(1. The Second Engineering Co., Ltd. of China Railway 18th Bureau Group, Tangshan 063000, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In view of the current problems such as less research on the combined support of anchor cable and frame lattice beam in slope reinforcement, the actual project of slope support on the left bank of a hydropower station was taken as the background. The stability of the original slope was analyzed by combining the limit equilibrium method and the finite element strength reduction method. The combined support scheme of anchor cables and frame lattice beams was studied. It mainly included anchor cable anchoring force calculation, anchor cable arrangement spacing, anchor cable length, optimal incidence anchoring angle and frame lattice beam size, etc. Finally, the support effect was studied by combining with numerical simulation. The results show that the original slope needs to be reinforced and supported. The error of the original slope safety coefficient obtained by the finite element strength reduction method is less than 1.5%-2.0% with the limit equilibrium method. The temperature loading method was used to simulate anchor cable prestressing for stability analysis of slope with combined support of anchor cable and frame lattice beams, and the combined support is effective and no obvious slip crack surface appears after the support. The study can provide reference for similar slope support projects.

Key words: slope stability; numerical simulation; strength reduction method; combined support

(上接第 183 页)

[3] 胡伟华, 彭刚, 黄仕超, 等. 基于声发射技术的混凝土动态损伤特性研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 123-127, 132.

[4] CHEN D, WANG E Y, LI N. Temporal and spatial evolution of acoustic emission and waveform characteristics of specimens with different lithology [J]. Journal of geophysics and engineering, 2018, 15(5):1878-1899.

[5] CHEN CHEN, XIANGQIAN FAN, XUDONG CHEN. Experimental investigation of concrete fracture behavior with different loading rates based on acoustic emission [J]. Construction and building

materials, 2020, 237: 117472.

[6] 刘妙燕, 陆俊, 明攀, 等. 疲劳荷载对橡胶混凝土损伤和断裂性能的影响[J]. 复合材料学报, 2021, 38(5): 1594-1603.

[7] BING C, LIU J. Experimental study on AE characteristics of three-point-bending concrete beams [J]. Cement & concrete research, 2004, 34(3):391-397.

[8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工混凝土断裂试验规程:DL/T5332-2005[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[9] 于江, 吕旭滨, 秦拥军, 等. 基于声发射技术的再生混凝土梁受弯过程的损伤特性研究[J]. 混凝土, 2020(8): 27-31.

Damage Rate Effect of Hydraulic Concrete Based on Acoustic Emission Parameters

CHEN Qian, JIA Yi-heng, CHEN Qing-hua, BU Jing-wu, XU Bo

(School of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In order to study the influence of loading rate on the damage evolution of hydraulic concrete, notched cubic specimens with side lengths of 300 mm and 450 mm were tested by wedge splitting test with different loading rates of 0.1 mm/s, 0.01 mm/s, 0.001 mm/s. Acoustic emission technology was used to monitor the acoustic emission signals of concrete in the damage process. Test results show that the variation of AE event rate during failure process of concrete can be divided into quiet, active, and attenuation period, among these the active period increases with the decrease of loading rate. The damage was defined according to the AE events, and it is found that the damage process of hydraulic concrete can be divided into three stages: crack initiation, acceleration and failure. The smaller the loading rate is, the faster the growth rate of the acceleration stage is. The damage evolution model based on the AE event obeys Weibull distribution, which can better reflect the influence of loading rates on the damage evolution of hydraulic concrete.

Key words: hydraulic concrete; loading rate; acoustic emission; damage; Weibull distribution