

文章编号:0559-9350(2010)06-0659-06

## 混凝土动态损伤的滞后特性

马怀发,王立涛,陈厚群,李德玉

(中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心,北京 100048)

摘要:混凝土材料在动载作用下存在应变率敏感效应,其产生机理尚待深入研究。本文总结了混凝土材料动态力学性能的基本规律,并基于混凝土在损伤过程中声发射凯塞效应的观测及相关研究成果,分析研究了惯性效应、预静载和水的黏性等因素对动载作用下混凝土材料的损伤滞后特性的影响,提出了在动载作用下混凝土材料变形滞后所产生的损伤滞后最终表现为应变率强化效应的观点。同时,通过全级配混凝土试件的弯折数值模拟计算,并基于动载作用下的变形滞后的观点,讨论了所引入率效应强化参数的物理意义。

关键词:混凝土;应变率效应;损伤滞后;凯塞效应

中图分类号:TV312

文献标识码:A

### 1 研究背景

混凝土材料在动载作用下具有与静载作用下不同的特性,一般称混凝土材料的这些率敏感特性为混凝土的动态特性,主要包括动载作用下混凝土的动态强度、动态弹性模量、峰值应变和泊松比等。试验研究表明<sup>[1]</sup>,混凝土的龄期、养护条件、配合比、水灰比、级配以及骨料类型(刚度、表面纹理)等对混凝土的应变率效应均有影响。不同加载速率、加载方式以及加载历史,混凝土材料反映出不同宏观动力特性。不同的研究者所采用的试验设备、测量方法以及混凝土试件的尺寸、形状不同所得到的试验结果也不相同。基于大量的试验成果总结,人们得出混凝土材料动态力学性能的基本规律:(1)应变率效应是固体材料的共性,可以认为是一种基本的材料特性<sup>[2-4]</sup>,即无论是金属材料还是混凝土材料,都存在应变率强化效应;(2)非均质材料较均质材料的应变率效应更为显著。混凝土级配对混凝土材料的动态性能产生重要影响,全级配混凝土比湿筛混凝土、普通混凝土较高强混凝土呈现出更强的率敏感效应<sup>[1,3,5]</sup>;(3)其他条件相同的情况下,湿混凝土动态强度高于干混凝土的动态强度。在水中养护的混凝土率敏感性高于在正常试验室条件下养护的混凝土。龄期增长,静态强度增长,但对加载速率的敏感性降低,强度越高,率敏感性越差<sup>[6]</sup>;(4)应变率对混凝土动态弹性模量的影响有与动态强度类似的强化规律,但对动态强度的影响较大<sup>[3]</sup>;(5)混凝土动态拉、压强度随应变速率增加而增长,二者规律相似,但在同一应变率变化范围内抗拉强度比抗压强度的应变率敏感性更为显著<sup>[1,7]</sup>;(6)加载到同样的应力水平时,混凝土材料表现出不同的损伤积累,静态时要比动态时产生更多的内部损伤。低速加载条件下与高速加载条件下混凝土材料具有不同破坏形态<sup>[2,8]</sup>。

混凝土损伤过程是其在荷载、温度、环境等作用下,材料的微细结构发生了变化,从而引起微缺陷成胚、孕育、扩展和汇合,导致材料宏观力学性能劣化,最终形成宏观开裂或材料破坏的现象。从细观的物理学的观点来看,损伤是材料产生晶粒位错、滑移、微孔洞、微裂隙等缺陷及其发展的结果;从宏观的连

收稿日期:2008-11-08

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(90510017);水利部公益专项(200701004;200901054)

作者简介:马怀发(1962-),河北人,博士,教授级高级工程师,主要从事水工抗震及大坝混凝土动态性能研究。

Email:mahf@iwhr.com

续介质力学的观点来看,损伤又可认为是材料内部微细结构状态的一种不可逆、能量耗散的演变过程。混凝土材料内部缺陷或微损伤的演化过程都同时依赖于应变和应变率<sup>[2]</sup>。在动载作用下混凝土材料微观结构发生的变形依赖于作用时间,即变形具有滞后性。

目前,有关混凝土应变率效应机理研究成果比较认同产生率强化效应的两种因素:(1)惯量效应,即在高应变率(大于 $10^{-1}/s$ )时的惯性力作用;(2)Stefan 效应,在低应变率(小于 $10^{-1}/s$ )下混凝土材料中毛细水的黏性作用。基于固体物理学理论对脆性材料的研究<sup>[4]</sup>将应变率效应归结为热活化机制与宏观黏性机制并行存在,相互竞争的结果。

本文将以混凝土变形、损伤与时间的相关性为出发点,通过数值模拟计算和试验观测对混凝土率效应的机理及所引入的混凝土率效应强化关系的物理意义进行探讨。

## 2 损伤滞后效应

**2.1 损伤声发射观测分析** 混凝土材料在荷载作用下会产生声发射(Acoustic Emission, AE)现象。声发射信号反映了混凝土内部的损伤状况,声发射凯塞(Kaiser)效应是对材料承受荷载产生损伤的一种表征。当荷载施加在已承受过一定荷载作用的混凝土上时,由于部分微元已经损伤破裂,应力已释放,并且这种损伤破裂是不可逆的,因此,在这个应力水平内不会有新的缺陷被激活而引起新的损伤破裂,也就没有声发射。只有当前施加的应力水平超过历史上的最大应力水平时,新的缺陷才会被激活,引起新的损伤破坏,激发声发射的再度发生。

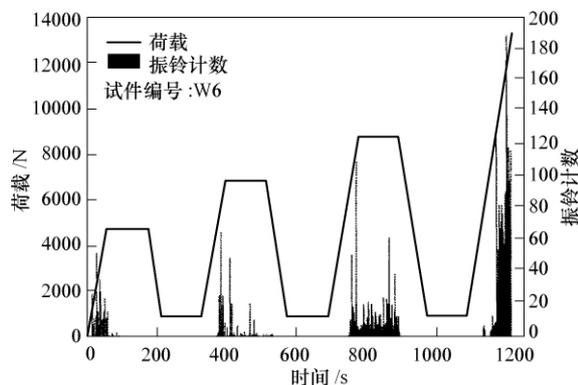


图1 梯形波循环加载作用下声发射振铃计数与荷载历程曲线的关系<sup>[9]</sup>

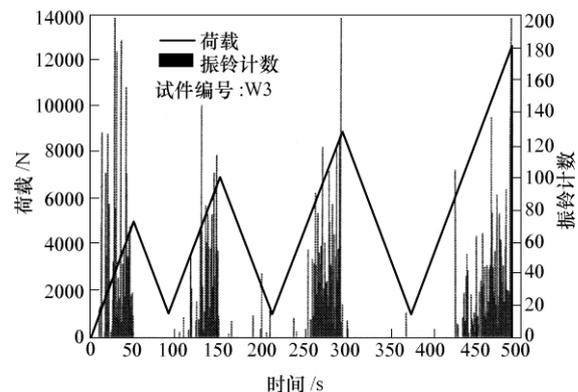


图2 三角波循环加载作用下声发射振铃计数与荷载历程曲线的关系<sup>[9]</sup>

吴胜兴等<sup>[9]</sup>对混凝土轴心受拉损伤声发射现象进行了试验研究。图1和图2分别为梯形波循环加载与三角波循环加载作用下声发射振铃计数与荷载历程曲线的关系。对于梯形波循环荷载,每当下一加载过程加至前一加载过程的最高值时开始有响铃记录。值得注意的是,在保持恒载过程中仍有声发射记录,尽管荷载没有增加,这说明损伤需要时间累积。而在三角波循环加载作用下,每次加载至峰值后就马上卸载,缺少像梯形波循环中的如蠕变过程,变形不够充分,因此,在还没有达到前一次最高应力水平时就有大量的声发射产生。尽管上述加载速率较低,但在三角波循环加载过程中仍有损伤滞后现象。这个试验结果也可解释为什么加载到同一荷载水平时静载所产生的损伤大于动载所产生的损伤。如果三角波加载速率更高,损伤滞后现象可能更为明显。

混凝土是亲水材料,因内部含有大量的孔隙具有巨大的内表面积,水分子及其在孔隙面处产生的表面力突显出强烈的液体与固体的相互作用。不同干湿条件的混凝土弯拉试验结果<sup>[9]</sup>也表明了湿混凝土较干混凝土在相同加载方式、同一荷载水平上的损伤滞后特性。

**2.2 惯性效应** Bischoff等<sup>[1]</sup>和Ragueneau等<sup>[10]</sup>认为,在高速应变率作用下,混凝土试件在纵向受压时,由于泊松效应,使得横向裂缝受到惯性围压的约束,而导致裂缝成核现象,并将混凝土材料抗压强度

的相对增强归结为惯性效应。对于冲击抗拉强度,由于加载速率很快,惯性效应使得峰值荷载滞后于微裂缝的局部化<sup>[11]</sup>,从而导致抗拉强度的显著增强。本文认为两种情况都是在快速加载过程中造成的,在快速加载情况下,试件内部各质点不能按照静载作用时静力与位移的平衡对应关系而产生变形,从应力状态到应变状态具有时间相关性,裂缝成核现象是材料变形不充分,应变滞后于应力产生的。

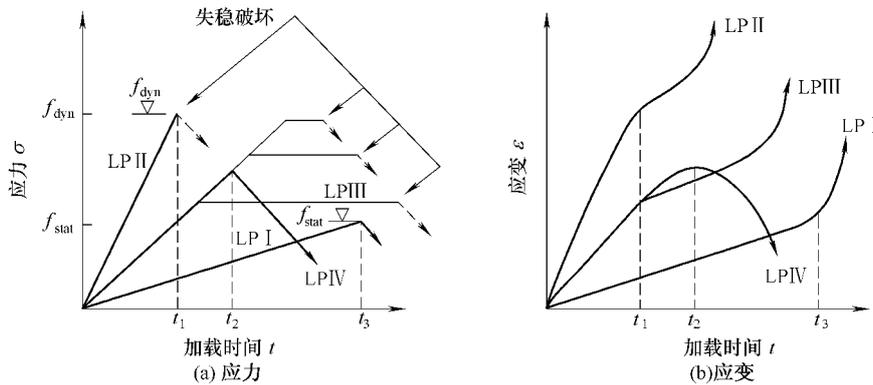


图3 应力与应变历史<sup>[3]</sup>

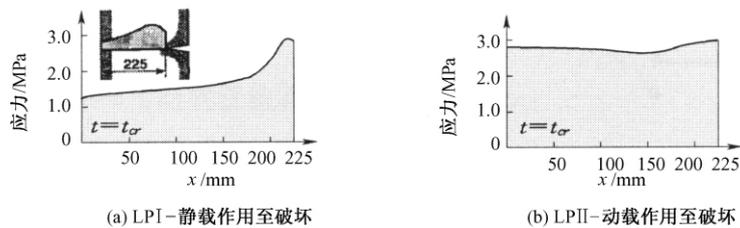


图4 缝端临界开裂时刻其横断面的应力分布<sup>[3]</sup>

Eibl 等<sup>[3]</sup>基于高应变率条件下的惯性效应,提出了一种反映因惯性而产生损伤滞后的率相关本构模型,通过对轴向分布荷载不同的加载历史(如图3)工况下裂缝开展过程进行了数值模拟,计算结果显示(如图4),在静载作用下缝端应力集中要比动载作用下强烈,而快速动载作用下缝端应力集中要比慢速动载作用下强烈。动载作用下失稳破坏时的外部应力(平均应力)高于静载作用下的外部应力,即所谓动载强度高于静载强度。加载过程 LPIII 和 LPIV 数值模拟显示,在短时间施加的外部荷载所产生的应力需要充足时间按照材料的实际刚度分布完成,即应力没有足够时间完成重分布导致缝端应力集中加强;外部应力加载到缝开展的临界应力以上后,突然卸载,已经开始增长的裂缝停止扩展。这一研究成果也说明,混凝土破裂过程是微观损伤的连续积累过程,微观损伤的积累导致宏观裂缝并最终导致刚度丧失。但是损伤不会在引起该损伤的荷载作用后立即产生,惯性作用使得损伤响应暂时延迟。

尽管 Eibl 等的研究是基于在高应变率下混凝土材料微观惯性效应,在模型中应变(变形)滞后假定为惯性作用引起,但所得到的结果不仅符合高应变率加载条件下的混凝土材料率效应的基本规律,而且同样可以解释较低应变率加载条件下的混凝土材料率效应的基本规律,比如图2中的损伤延迟现象。模型中变形延迟也有可能是混凝土毛细水和其它因素所产生的损伤延迟效应。

本文认为变形是产生损伤的直接原因,应变(变形)滞后产生了损伤滞后效应,而损伤滞后再表现为混凝土应变率强化现象。

### 2.3 预静载作用下的损伤滞后效应 对全级配混凝土动态试

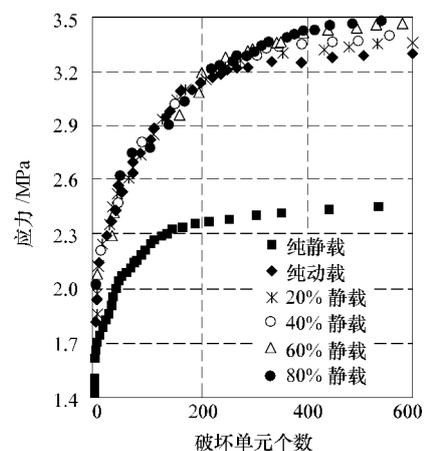


图5 不同荷载水平所产生的破坏单元<sup>[16]</sup>

验研究发现<sup>[12-13]</sup>，在一定水平下的预静载对混凝土动弯拉强度产生强化作用。作者在文献[5, 14-15]中对该试验现象进行了数值模拟计算，认为预静载对混凝土动弯拉强度的强化作用是刚度损伤弱化和率效应强化共同作用的结果。文献[16]给出了图5所示的四级配混凝土试件在静载及不同预静载下动载作用所产生的破坏单元。由图5看出，在应力达到2.3MPa时，在静载作用下约有140个单元产生损伤破坏，而相同荷载水平的冲击荷载仅约有30个损伤破坏单元。另外，在应力水平大于3.2MPa之后，破坏单元的数量受预静载水平影响较大，同样数量的破坏单元所需动载随预静载水平的提高而增大。这一算例的计算结果具有普遍性，在相即同荷载水平下静载所产生损伤积累大于动载所产生的损伤积累，或者可解释为动态损伤滞后于静态损伤，一定水平的预静载作用彰显了损伤的滞后作用。

### 3 低应变率下混凝土材料率效应影响因素

根据混凝土率效应的基本试验成果，作者给出了混凝土抗拉强度和弹性模量随应变率变化的一般表达式<sup>[14]</sup>：

$$\begin{cases} f_t(\dot{\varepsilon}) = f_{ts} H_t(\dot{\varepsilon}) \\ E(\dot{\varepsilon}) = [1 - d(\varepsilon)] E_0 H_E(\dot{\varepsilon}) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $E_0$ 为初始弹性模量； $d(\varepsilon)$ 为损伤变量，是拉应变的函数，由文献[17]中双折线损伤模型确定； $f_{ts}$ 为混凝土材料的静态抗拉强度； $f_t(\dot{\varepsilon})$ 、 $E(\dot{\varepsilon})$ 表示混凝土动抗拉强度和动弹性模量是拉（或压）应变率 $\dot{\varepsilon}$ 的函数； $H_t$ 为混凝土抗拉强度的强化系数； $H_E$ 为弹性模量强化系数。

$H_t$ 、 $H_E$ 与应变率 $\dot{\varepsilon}$ 关系的经验公式为：

$$\begin{cases} H_t(\dot{\varepsilon}) = \exp\{ [A_t (\lg |\dot{\varepsilon}| + B_t)]^{C_t} \} \\ H_E(\dot{\varepsilon}) = \exp\{ [A_E (\lg |\dot{\varepsilon}| + B_E)]^{C_E} \} \end{cases} \quad (2)$$

其中： $A_t$ 、 $B_t$ 、 $C_t$ 为强度强化参数； $A_E$ 、 $B_E$ 、 $C_E$ 为弹性模量强化参数。

动力学方程<sup>[14]</sup>为

$$[M]\{\Delta\ddot{U}_d(t)\} + [C]\{\Delta\dot{U}_d(t)\} + [K_d(t)]\{\Delta U_d(t)\} = \{\Delta P_d(t)\} + \{\Delta P'_d(d)\} + \{\Delta P_s(d)\} \quad (3)$$

式中，动力损伤所产生的荷载增量 $\{\Delta P'_d(d)\} = \sum_e H_E^e(\dot{\varepsilon}^e) \Delta d^e(\varepsilon^e) [K_0^e]\{U_d(t + \Delta t)\}$ ；由静位移因损伤所产生的荷载增量 $\{\Delta P_s(d)\} = \sum_e \Delta d^e(\varepsilon) [K_0^e]\{U_s\}$ ；单元损伤变量增量为 $\Delta d^e(\varepsilon) = [d^e(\varepsilon_{t+\Delta t}) - d^e(\varepsilon_t)]$ ； $[K_0^e]$ 为初始单元刚度矩阵，认为在每一时间步内，弹性模量强化系数 $H_E(\dot{\varepsilon})$ 为常量，由上一步的应变率确定； $[M]$ 为质量阵； $[C]$ 为阻尼阵； $[K_d(t)]$ 为动刚度阵； $\{\Delta U_d(t)\}$ 、 $\{\Delta\dot{U}_d(t)\}$ 和 $\{\Delta\ddot{U}_d(t)\}$ 分别为结点加速度增量、速度增量和动位移增量； $\{\Delta P_d(t)\}$ 为结点动荷载列阵增量； $\{U_d\}$ 分别为结点动位移； $\{U_s\} = \{U_s(t=0)\}$ 为施加动载的前一时刻的结点静位移。

在式(3)的动力学方程中包含惯性力项、阻尼项，同时考虑了应变率对混凝土材料动态强度和弹性模量的强化作用。下面将通过图6所示的三级配混凝土三分点弯拉数值模拟计算，讨论动力学方程中的惯性力项、阻尼项以及强化参数取值对计算结果的影响，讨论强化参数的物理意义。

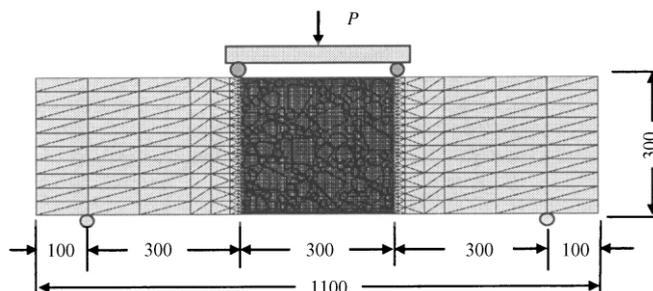


图6 三级配混凝土试件有限元网格剖分(单位:mm)

混凝土及其各相组分材料力学特性参数取值如表 1、表 2,考虑到拉、压应率敏感性差异,压应率率强化系数取值稍小于拉应率率强化系数,静态加载步长为 0.6kN,冲击加载速率为 600kN/s,时间步长取 0.001s。依次进行纯动载和施加 20%、40%、60% 和 80% 预静载后再加动载(包括纯静载),进行数值模拟计算。数值模拟计算主要考察式(1)中的强化系数、阻尼和惯性力对数值计算结果的影响。为此在动力加载过程中,分别按照以下三种方案进行:(1)考虑阻尼,阻尼比取 0.02;按表 1 给出的强化系数并按式(1)计算动抗拉强度、动弹性模量;(2)仅考虑阻尼,阻尼比取 0.02;不引入强化参数;(3)既不考虑阻尼,也不引入强化参数。

表 1 混凝土各相组分材料力学特性参数

材料	弹性模量 /GPa	泊松比	抗拉强度 /MPa	容重 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )
骨料	50.00	0.200	6.00	27.00
砂浆	40.00	0.160	4.50	21.00
黏结面	30.00	0.150	3.50	24.00
混凝土	32.00	0.167	4.00	24.00

表 2 损伤及强化参数

	残余强度系数 $\lambda$	残余应变系数 $\eta$	极限应变系数 $\xi$	强度强化参数			弹性模量强化参数		
				$A_i$	$B_i$	$C_i$	$A_E$	$B_E$	$C_E$
拉	0.10	3.00	10.00	0.20	6.00	2.00	0.17	6.00	2.00
压	0.10	3.00	10.00	0.12	6.00	2.00	0.10	6.00	2.00

计算得到预静载对混凝土动态增强系数的影响(见图 7)。从图中 3 种方案的计算结果看,引入强化参数后的计算值和试验值吻合较好。阻尼力(结构阻尼)几乎对计算结果不产生影响。事实上,以上数值模拟计算和试验动载加载频率为 1Hz,远远低于图 6 中三级配混凝土试件的基频 400Hz。由计算模型中惯性力所产生的动态增强系数仅为 1.04。显然,仅考虑动力学方程式(3)中的惯性力和结构阻尼,其计算结果并不符合试验结果。在考虑引入式(1)所表示的应变速率强化作用后才能得到与试验结果一致的结论。从现有研究成果判断,除惯性力和阻尼力之外肯定还有其它因素产生率强化作用,比如混凝土材料中毛细水的 Stefan 效应及其本身的热活化效应、声子阻尼效应等因素,可以认为式(1)所表示的混凝土材料率效应强化关系反映了这些因素的综合影响。

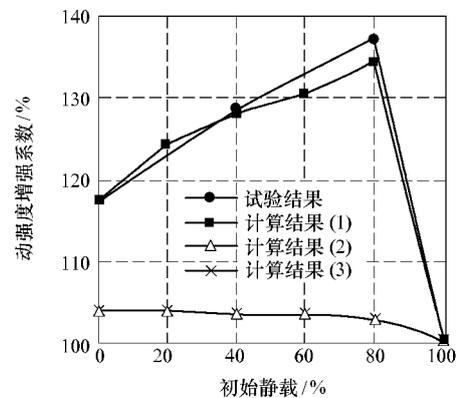


图 7 各种因素对动弯抗拉强度计算结果的影响

式(1)模型的优点是, $d(\varepsilon)$ 可以采用率无关的损伤模型即静态损伤模型,而强化系数 $H_i(\dot{\varepsilon})$ 和 $H_E(\dot{\varepsilon})$ 曲线可通过第二节的简单动态加载试验的观测成果拟合得到,具有良好的试验基础。但是, $H_E(\dot{\varepsilon})$ 和 $H_i(\dot{\varepsilon})$ 为应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 的单调增函数,在动态单调加载条件下可以近似适用,但在持时较长的往复加载工况下的适用性还有待进一步探讨。

#### 4 结论

本文通过对混凝土损伤声发射的凯塞效应、数值模拟计算及其相关研究成果的分析,研究了动载作用下混凝土材料的损伤滞后特性,认为混凝土材料在外部荷载作用下其微细观结构发生变形或位错,这种变形或位错产生损伤,而变形或位错具有时间相关性,即变形需要时间积累。这种变形的滞后性产生了损伤滞后性,而最终表现为应变速率强化效应。限于目前的认识水平,作者提出采用式(1)的应变速率强化关系是解决实际工程问题的实用方法,但是,鉴于应变速率效应是变形滞后效应的观点,作者认为弹性

模量和抗拉强度不仅是应变率的函数,而且存在时间相关性。假如有充分的变形时间,某一应变率发生时刻由率效应强化关系确定的强化系数随时间的延迟会回归到无强化的状态,即  $H(\dot{\epsilon}) \rightarrow 1$ ,因此强化参数表示为  $H(\dot{\epsilon})g(t-\tau)$  形式,其中  $g(t-\tau)$  为延迟函数,作为一种材料特性。这样表示使式(1)的应变率强化关系更能反映因变形滞后的特性。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] Bisehoff P H , Perry S H. Compressive behavior of concrete at high strain rates [J]. Materials and Structures , 1991 , (24) : 425 - 450.
- [ 2 ] 王礼立,蒋昭镛,陈江瑛. 材料微损伤在高速变形过程中的演化及其对率型本构关系的影响[J]. 宁波大学学报,1996,9(3):49-55.
- [ 3 ] Eibl J, Schmidt-Hurtienne B. Strain-rate-sensitive constitutive law for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics , ASCE , 1999 , 125(12) : 1411 - 1420.
- [ 4 ] 戚承志,钱七虎. 材料变形及损伤演化的微观物理机制[J]. 固体力学学报,2002,23(3):312-317.
- [ 5 ] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 混凝土细观结构不均匀性对其动弯拉强度的影响[J]. 水利学报,2005,36(7):846-852.
- [ 6 ] Kaplan S A. Factors affecting the relationship between rate of loading and measured compressive strength of concrete [J]. Magazine of Concrete Research , 1980,32(111):79-88.
- [ 7 ] Malvar L J , Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. ACI Material Journal , 1998,95(6):735-739.
- [ 8 ] 陈厚群,丁卫华,党发宁,等. 混凝土 CT 图像中等效裂纹区域的定量分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2006,4(1):1-7.
- [ 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 ] Ragueneau F , Gatuingt F , et al. Inelastic behavior modelling of concrete in low and high strain rate dynamics [J]. Computer and Structures , 81(2003)1287-1299.
- [ 11 ] Rossi P , Toutlemonde F. Effect of loading rate on the tensile behavior of concrete [J]. Materials and Structures , 1996,29:116-118.
- [ 12 ] 侯顺载,李金玉,曹建国,等. 高拱坝全级配混凝土动态试验研究[J]. 水力发电,2002(1):51-53.
- [ 13 ] 陈厚群. 全级配大坝混凝土动态性能研究研究报告[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2004.
- [ 14 ] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 应变率效应对混凝土动载弯拉强度的影响[J]. 水利学报,2005,36(1):69-76.
- [ 15 ] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 预静载作用下混凝土试件的动弯拉强度[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2005,3(3):168-172.
- [ 16 ] 马怀发,陈厚群. 全级配大坝混凝土动态损伤破坏机理研究及其细观力学分析方法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- [ 17 ] 马怀发,陈厚群,黎保琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报,2004(10):27-35.

### Mechanism of dynamic damage delay characteristic of concrete

MA Huai-fa , WANG Li-tao , CHEN Hou-qun , LI De-yu

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research , Beijing 100048 , China)

**Abstract:** Concrete materials exhibit much sensitivity of mechanical behaviors to loading rates or strain rates , but the mechanism of strain rate effect induced is not well understood. Based on the observation of acoustic emission tests and the related literatures , the damage delay characteristics of concrete under dynamic loading are investigated and it is revealed that the strain-rate effect is originated from the deformation delay resulted in damage delay. The numerical simulations of specimens of fully-graded concrete are conducted to study the influence of inertial force , static preloading and water viscosity on the dynamic damage delay of the concrete as well as the physical meanings of the involved dynamic strength enhancing coefficients in view of the deformation delay.

**Key words:** concrete; strain rate effect; damage delay; Kaiser effect

(责任编辑:王冰伟)