

# 宽频非线性超声法在混凝土扩展微裂纹的应用\*

许颖, 曹宇萌, 刘欢

(哈尔滨工业大学(深圳)广东省土木工程智能韧性结构重点实验室 深圳, 518055)

**摘要** 混凝土微裂纹的扩展对于重要混凝土结构或者疲劳荷载下的建筑或桥梁的安全性和耐久性具有较大影响,传统的无损检测方法对微裂纹不敏感,针对此问题,提出一种利用宽频非线性超声调制原理检测混凝土扩展微裂纹的方法。借助扩展有限元仿真法,模拟超声激励含微裂纹混凝土模型产生应力波,对混凝土模型接收点的位移信号进行频谱分析,建立了微裂纹扩展长度与非线性调制法中所定义的损伤指标峰值之间的关系。通过仿真模拟和试验检测,研究了宽频激励下非线性超声检测荷载下扩展微裂纹的可测性,从而实现对混凝土微裂纹扩展趋势的实时动态监测。

**关键词** 混凝土扩展微裂纹;宽频非线性超声调制;无损检测;扩展有限元

**中图分类号** TB553

## 引言

混凝土材料在长期荷载作用下,或者由于环境腐蚀等原因,混凝土结构经常会出现裂纹<sup>[1]</sup>。普通混凝土结构在正常使用阶段一般允许带裂缝工作,但对于重要建筑、核电站安全壳或者近海的高架桥是不允许有微裂纹(宽度在100~150 μm以下)的<sup>[2-3]</sup>。对混凝土材料来说,随着裂纹的不断扩展,裂纹会从原先的稳定状态发展到不稳定状态,从而影响结构的耐久性和使用寿命。在实际工程中,相对于静态裂纹,动态裂纹对混凝土的危害更大,如果检测不及时,裂纹会不断扩展成影响结构强度甚至导致整个结构破坏的宏观裂纹<sup>[4]</sup>。现有的动态裂纹检测研究基本都是定性研究而未进行定量研究,如何通过一种有效的方法实时在线监测动态扩展微裂纹,对于保证混凝土强度和耐久性有着重要的意义。

超声无损检测技术因为其便携性、操作简便等优点,在混凝土损伤检测领域得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。混凝土的损失会影响超声波波速或者幅值的变化,所以早期学者通过此特征来判断混凝土损伤。在材料损伤较小时,因为混凝土内部结构相对来说比较复杂,上述线性声学参数的变化并没有那么明显,所以国内外的学者开始关注材料损伤后超声波表现出的非线性现象,利用非线性波动理论来检测材料的

早期损伤。相关研究表明<sup>[6-11]</sup>,非线性超声特征会因为结构内部的局部软化或者裂纹而出现较大的变化。在材料发生细微损伤时,非线性超声特征的变化相比传统的超声无损检测会更明显,且不受工件形状的限制<sup>[12]</sup>。目前常用的非线性声场调制方法是基于双频激励的,即输入一个高频超声信号和一个低频振动信号,但是由于混凝土的非均质性,找到一组特定的激励频率产生明显的调制现象比较困难。

笔者研究中发现,不同频率的高低频超声波可以两两发生多对超声调制,从而使得超声调制现象最大化,因此提出一种利用宽频非线性超声调制原理检测混凝土扩展微裂纹的方法,建立微裂纹扩展长度与非线性调制法中所定义的损伤指标峰值之间的关系。同时,进行了超声检测微裂纹扩展仿真模拟和压电超声对微裂纹扩展损伤检测试验,研究了宽频激励非线性超声检测荷载下扩展微裂纹的可测性,从而实现对混凝土微裂纹扩展趋势的实时动态监测。

## 1 基本原理

### 1.1 扩展有限元法不连续面建模

在标准三维有限元框架内,当裂纹位于节点上时,一般采用双节点的方法来处理<sup>[13-14]</sup>。

\* 国家自然科学基金资助项目(51778191, 52078173);广东省重点实验室资助项目(2023B1212010004);深圳市高等院校稳定支持计划资助项目(GXWD20231129175636001)

收稿日期:2022-03-02;修回日期:2022-10-16

采用最大主应力准则作为裂纹开裂准则,即当最大主应力达到材料屈服应力值时裂纹萌生,其表达式<sup>[15]</sup>为

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{\max} \rangle}{\sigma_{\max}^0} \right\} \quad (1)$$

其中: $\sigma_{\max}^0$ 为混凝土允许的最大应力; $\langle \rangle$ 为Macaulay括号,以确保主压应变下材料不会损坏。

当最大应力达到 $\sigma_{\max}^0$ 时,混凝土开始开裂,结构出现微裂纹。

## 1.2 非线性超声调制法评估参数

超声调制现象的基本原理是当超声波传播到微裂纹时将与微裂纹发生相互作用。随着波形的振动,微裂纹两接触面循环开闭,使得两接触面相互打击并相互摩擦,导致超声波信号发生畸变出现调制边频<sup>[6]</sup>。当材料存在微裂纹时,材料的非线性发生变化,调制边频的数量会随着材料非线性变化而变化,由此可以判断材料的损伤程度。宽频超声信号调制示意图如图1所示。

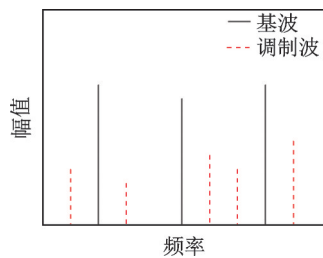


图1 宽频超声信号调制示意图

Fig.1 Broadband ultrasonic signal modulation diagram

针对本研究所提出的基于宽频激励下的非线性超声调制法,识别混凝土梁损伤的方法拟利用边带峰计数(sideband peak count,简称SPC)<sup>[16]</sup>,将各个频率值以基波频率做归一化处理。边带峰计数的定义为在归一化频域中,频率幅值在阈值以上的调制边频数量与所有频率成分的数量之比。当阈值从小到大变化时,边带峰计数的值也会相应变化。边带峰计数表示为

$$SPC = \frac{N_{\text{peak}}}{N_{\text{total}}} \quad (2)$$

其中: $N_{\text{peak}}$ 为阈值之上的归一化频率幅值数量; $N_{\text{total}}$ 为总的归一化频率幅值数量。

相比于边带峰个数,主频的个数可以忽略不计,所以为了计算方便,由式(2)可见没有将主频和边带峰的个数分开计算。当混凝土梁的非线性变大时,调制边频的数量会增多,边带峰计数值也会变大,这是因为不同频率成分之间的相互作用增强

了。 $N_{\text{peak}}$ 计算图示频率见图2。

损伤因子示意图见图3,其定义为在同一阈值下受损梁的SPC值减去无损梁的SPC值所得到的差值。随着阈值的变化,损伤因子也会发生相应的变化。在某一阈值处,损伤因子-阈值曲线会出现峰值,该点的损伤因子即为损伤因子峰值。综上,损伤因子为SPC差,损伤因子峰值为SPC差的最大值。

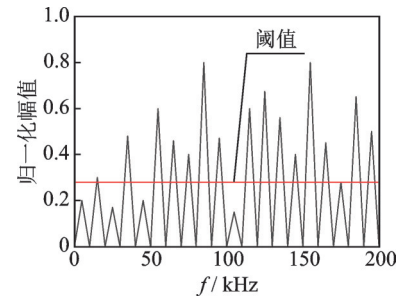


图2  $N_{\text{peak}}$ 计算图示频率

Fig.2  $N_{\text{peak}}$  to calculate the graphic frequency

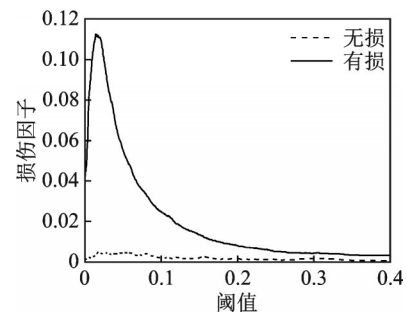


图3 损伤因子示意图

Fig.3 Damage factor diagram

## 2 宽频激励下的扩展单裂纹检测

笔者利用有限元软件ABAQUS,建立了宽频激励非线性超声调制检测混凝土扩展微裂纹的数值模型。通过以下两步来利用非线性超声特征识别动态扩展裂纹,并判断出损伤程度:①模拟混凝土四点弯曲梁微裂纹扩展;②模拟在带有扩展微裂纹的混凝土梁中非线性超声调制的传播。

### 2.1 宽频激励下的扩展裂纹检测数值

#### 2.1.1 扩展微裂纹有限元模型

因为混凝土的内部一般都存在原始缺陷,所以在混凝土梁模型上预制一个初始裂纹,这样能够控制裂纹的扩展位置和方向,同时也能更好地确定裂纹扩展长度和损伤指标之间的关系。

通过有限元软件ABAQUS,基于扩展有限元法(extended finite element method,简称XFEM)建立了含预制裂纹的混凝土四点弯曲梁裂纹扩展模型,如

图4所示。模型的几何尺寸如下:长 $L=1\ 000\text{ mm}$ ,宽 $B=120\text{ mm}$ ,高 $H=120\text{ mm}$ ,预制裂纹设置在跨中位置,预制裂纹的长度为 $40\text{ mm}$ 。梁的跨度与高度之比为4,即 $S=800\text{ mm}$ 。将相互作用模块中垫块与梁接触设置为刚体约束,左边垫块设置为固定端,右边垫块设置为滑动端,垫块与加载点距离 $D=200\text{ mm}$ ,混凝土强度等级为C30,开裂准则采用最大主应力开裂准则。相关混凝土材料物理力学参数如表1所示。

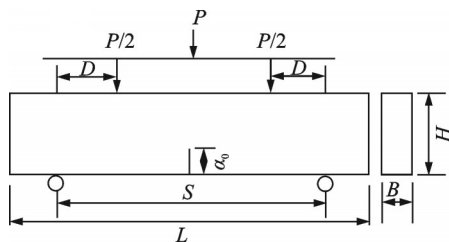


图4 含预制微裂纹切口的混凝土四点弯曲梁计算模型 (单位:mm)

Fig.4 Calculation model of four-point bending concrete beam with precast microcrack notch (unit: mm)

表1 混凝土材料物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of concrete materials

弹性模量/GPa	泊松比	极限抗拉强度/MPa	断裂能/ $(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	密度/ $(\text{g}\cdot\text{mm}^{-3})$
28.46	0.2	1.45	0.11	2.39

混凝土模型单元采用C3D8R实体单元,垫块采用离散刚体形式,加载方式通过垫块采用位移加载,划分网格时网格密度为 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。混凝土四点弯曲梁网格模型如图5所示。



图5 混凝土四点弯曲梁网格模型

Fig.5 Calculation model of four-point bending concrete beam with precast microcrack notch

### 2.1.2 宽频超声有限元模型参数

压电超声产生的是超声振动信号,同时也是应力波信号。在ABAQUS数值模拟中,用位移载荷模拟超声激励产生应力波。宽频激励信号的加载方式采用的是超声波垂直梁外表面入射激发的方式。由于在结构中传播时会产生不同的导波模式、驻波模式和共振模式,所以当一组宽频带脉冲信号作为激励信号时,三者结合会产生高频和低频信号。采用的激励信号为 $0.2\ \mu\text{s}$ 的脉冲信号,宽频激励信号

的波形如图6所示。

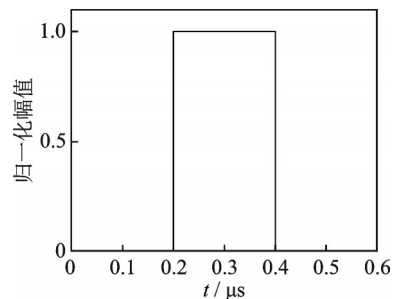


图6 宽频激励信号的波形

Fig.6 Wideband excitation signal waveform

混凝土梁模型信号的宽频激励下激励接收点位置如图7所示。本模型将激励点的位置和接收点的位置设置在同一水平线上,设置了4个激励接收路径,即图中I,II,III,IV这4个路径,4个路径与梁底端的距离分别为20,40,70以及100 mm,其中A为激励点,B为接收点。无损对照模型的激励接收点位置与有损时相同。

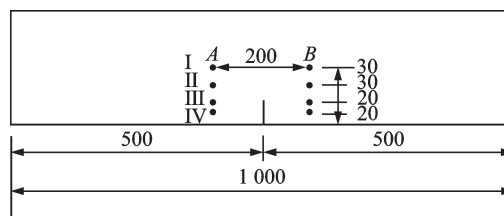


图7 宽频激励下激励接收点位置(单位:mm)

Fig.7 Position of excitation receiving point under broad band excitation (unit:mm)

### 2.1.3 结果分析

对于静力荷载作用下的混凝土四点弯曲梁微裂纹扩展的仿真采用单一载荷步进行模拟计算。

图8为混凝土裂纹扩展图,即混凝土梁开裂过程的最大主应力云图。在加载刚开始不久时,梁顶部主要以压应力为主,底部裂纹附近的应力以拉应力为主;随着荷载进一步增加,裂纹尖端的应力也逐渐增大。当荷载增加到66.7%的极限荷载时,裂纹尖端的拉应力达到了最大抗拉强度值,这时预制裂纹张口的位移开始增加,梁开始出现微裂纹。裂纹尖端的微裂纹开始垂直向上开展,开展一段距离后发生偏转。出现这种现象的原因是数值模型中材料模块输入了非线性本构关系,定义了损伤范围和损

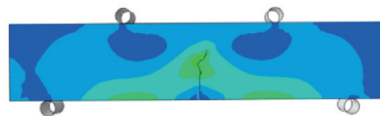


图8 混凝土裂纹扩展图

Fig.8 Concrete crack propagation diagram

伤因子,以此模拟现实中混凝土非均质多相特性,并且ABAQUS的XFEM方法是采用插值多项式来描述单元内部的位移场,所以裂纹扩展过程不会像理论计算结果一样一直垂直向上扩展。整体来看,裂纹发展路径与典型的I型裂纹基本符合。

当缝高比  $a_0/D$  为0.2时,混凝土四点弯曲模型所对应的荷载-裂纹口张开位移(crack mouth opening displacement,简称CMOD)如图9所示。由图可以看出,混凝土开裂分为以下几个阶段:①弹性阶段,在加载初期荷载  $P$  一直在增大,裂纹张口位移也在增加,直到预微裂纹尖端的拉应力达到最大抗拉强度,这个阶段梁的刚度 ( $d_p/d_{CMOD}$ ) 保持不变,混凝土还未发生开裂;②裂纹扩展阶段,混凝土开始出现微裂纹,荷载与位移之间呈非线性关系,梁的刚度开始减小,当荷载  $P$  达到最大时,梁的刚度减小至0;③混凝土梁失稳阶段。

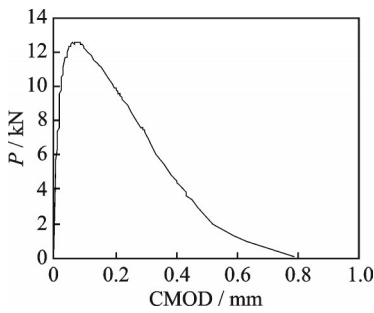


图9 荷载-裂纹口张开位移

Fig.9 Load - crack opening displacement

混凝土梁有损模型与无损模型频域对比如图10所示。由于在有损介质中传播时,超声波会发生非线性畸变,从而会产生调制边频,所以在图中也能看出有损模型的频域成分更加复杂一些。

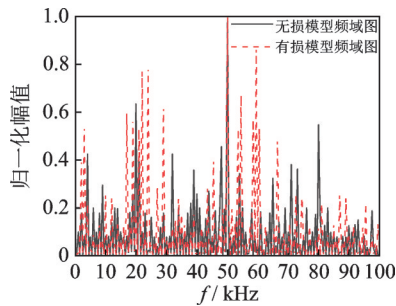


图10 混凝土梁有损模型与无损模型频域对比图

Fig.10 Frequency domain comparison between damaged model and intact model

荷载作用下单条裂纹扩展过程损伤指标计算值如图11所示,其中  $l$  表示裂纹扩展长度。由图可知,损伤因子都随着阈值的增大先变大后变小,损伤因子幅值都出现在2%~5%的阈值范围内。当阈值大于0.25时损伤因子的值就降为0,由此可知调制

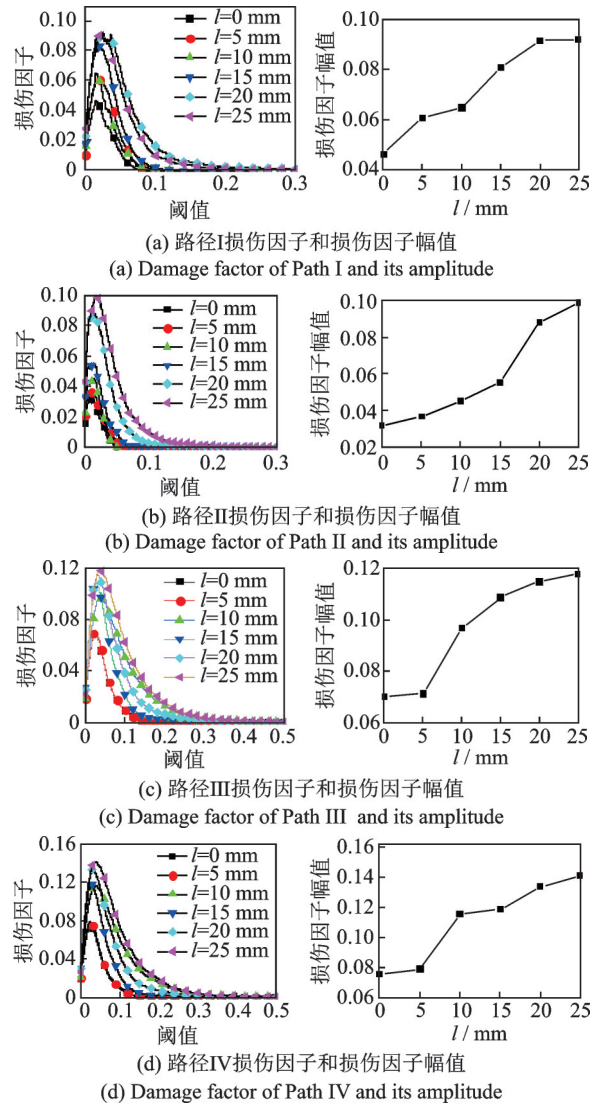


图11 荷载作用下单条裂纹扩展过程损伤指标计算值

Fig.11 Calculated damage index value of single crack propagation process under static load

边频的幅值一般不会超过基频幅值的0.25倍。

由损伤因子幅值的变化情况可知,静力加载时随着裂纹的不断扩展,损伤因子也在不断增大,裂纹从0扩展到25 mm时,4条路径的损伤因子增大了2/3。与此同时,损伤因子的幅值也随之增长,其增长率随裂纹扩展长度变化如图12所示。当裂纹尖端扩展长度从5 mm扩展到15 mm时,损伤因子幅值的增长率从0.05增大到了0.55。由此可见,在5~15 mm之间裂纹扩展非常迅速,损伤因子幅值的增长速率也很快。这说明在微裂纹扩展期间,混凝土的非线性力学行为也在增强,与此同时调制现象更为明显。

损伤因子幅值并不是随着激励接收路径与微裂纹的距离变化而发生单调变化。数值分析结果表明,如果施加的信号可以激发微裂纹的非线性,那么损伤因子幅值大小与激励接收路径是否通过微裂纹无关。因此,微裂纹的走向、位置对本检测方法的有

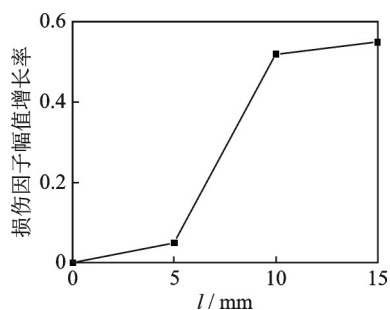


图 12 损伤因子幅值增长率随裂纹扩展长度变化图

Fig.12 The amplitude growth rate of damage factor varies with the crack propagation length

效性影响较小,证明了本方法对混凝土微裂纹扩展趋势实时动态监测的可行性。

## 2.2 宽频激励下的扩展裂纹检测试验

### 2.2.1 试验系统设计

由于试验条件的限制,本试验仅对宽频激励下混凝土静力荷载扩展单裂纹和多裂纹检测进行试验研究。

裂纹扩展监测试验系统配置如图 13 所示。采用梁的四点弯曲试验来控制裂纹的扩展,混凝土梁在试验前预制了裂纹切口,加载设备为电液伺服试验机,跨中位移加载速度为 0.05 mm/min。由于在试验过程中使用一般的仪器很难准确捕捉到混凝土断裂过程的具体情况,因此在试验中采用如图 14 所示的 DIC 测量装置来观察试件的微裂纹发展趋势。根据 DIC 的分析结果,可以得到试件在受力过程中微裂纹的张开口位移值和微裂纹扩展的长度。

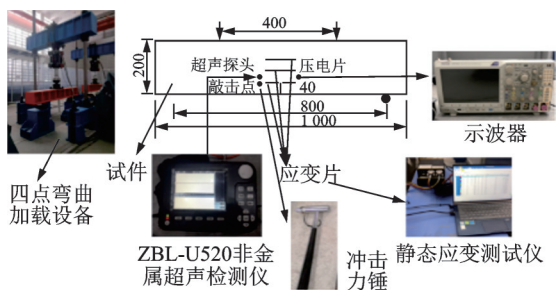


图 13 裂纹扩展监测试验系统配置(单位:mm)

Fig.13 Configuration of crack growth monitoring experimental system (unit:mm)

试验中需要一个能产生超声波监测信号并能采集试件中包含损伤信息传感信号的波形发生与数据采集系统来进行非线性超声检测。考虑到试验室的现有条件以及非线性超声调制现象的生成条件,本次试验利用敲击激励时间或者结构产生自振,即采用敲击-超声调制法<sup>[17]</sup>来产生宽频信号。该方法通过入射一系列 50 kHz 的超声波使裂纹发生开合,同时

进行敲击,使得试件产生自振,敲击产生的波动位移场穿过裂纹,从而实现试件的损伤检测。图 15 为非线性超声调制法试验连接图。在检测过程中,因为超声波在传播过程中的抗散射和衍射波的干扰能力会变差,也会发生较大的衰减,且如果激励点和接收点相距太远会降低信号的强度,所以在试验中选择了试件表面微裂纹附件的位置作为激励点和接收点,而没有在左右两端选取激励点和接收点。同时为了消除敲击位置对试验结果的影响,在试件敲击面固定位置划定敲击点,保证力锤每次敲击时产生的振动模态是相似的。选用谐振频率为 1 000 kHz、直径为 10 mm、厚度为 5 mm 的圆形压电陶瓷片用于接收超声信号。

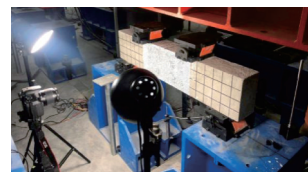


图 14 DIC 测量装置示意图

Fig.14 DIC measurement diagram

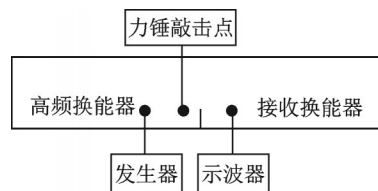


图 15 非线性超声调制法试验连接图

Fig.15 Schematic diagram of nonlinear ultrasonic modulation method test

根据试验过程中的功能不同,将试验系统分为 3 个部分,即试件、加载设备和波形发生与数据采集系统。

本次试验选用强度等级为 C30 的普通混凝土,其配合比如表 2 所示。水泥选用 P.O.42.5 级的普通硅酸盐水泥,粗骨料为级配良好的天然花岗岩碎石,细骨料选用细度模数为 2.8 的中砂。

表 2 普通混凝土配合比

Tab.2 Mix proportion of ordinary concrete

混凝土强度等级	水	水泥	沙子	石头
C30	0.48	1	1.47	2.74

单裂纹扩展检测试件的尺寸设置完全等同于模拟的模型,在试件的正中间预制 40 mm 长的微裂纹,将 3 个预制单裂纹的试件标记为  $F_1$ ,  $F_2$  和  $F_3$ 。

### 2.2.2 试验结果分析

通过试验得到试件加载过程中的荷载-裂纹张开口位移曲线,如图 16 所示。在加载过程中,曲线

在荷载达到  $73.5\%P_{max}$  时出现非线性,随着荷载的不断增大,位移值也随之增大,但是增长速率较小。进入卸载阶段,荷载逐渐减小,但是微裂纹张口位移值却急剧增大。同时由图可以看出,在达到最大荷载值之前,3个试件的裂纹张开位移都小于  $0.1\text{ mm}$ ,即属于微裂纹( $100\sim 150\ \mu\text{m}$ )范畴,所以本研究采用非线性超声方法进行检测具有优势。

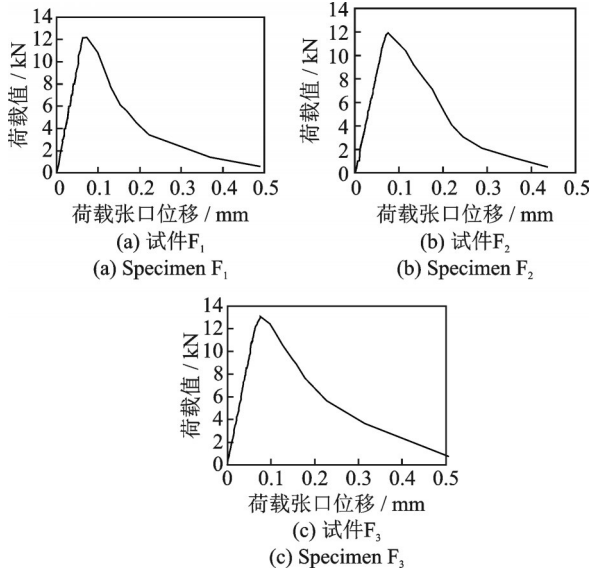


图16 试件的荷载-裂纹张口位移曲线

Fig.16 The load-crack opening displacement curve of the specimen

接收点采集信号如图17所示。

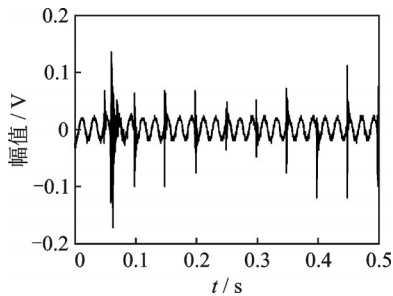
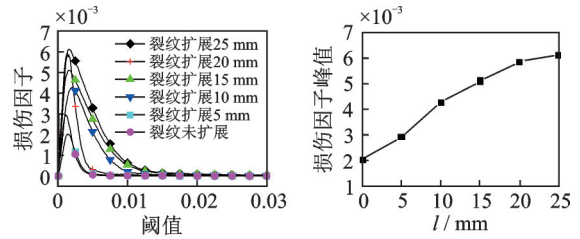


图17 接收点采集信号

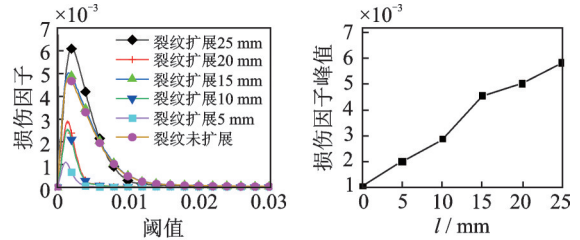
Fig.17 Acquisition signal at receiving point

识别混凝土损伤的方法同样采用边带峰计数法,不同裂纹长度下混凝土损伤指标计算值如图18所示。由图18可知:微裂纹扩展检测试验所得的损伤指标与阈值关系曲线走势相同,其中损伤因子均随着阈值先增大后减小到0,损伤因子的幅值基本上都出现在  $0.0015$  的阈值附近;3个试件的损伤因子峰值随着预制裂纹尖端微裂纹长度的增加而逐渐增大。

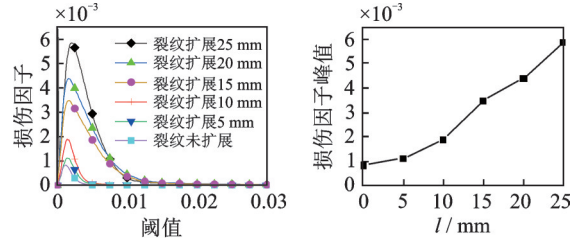
出现上述现象主要有以下原因:①在微裂纹处,混凝土应力-应变的非线性增强;②在微裂纹宽度变化不大时,微裂纹长度的增加意味着损伤的增大,导



(a) 试件F1损伤因子和损伤因子峰值  
(a) Damage factor of Specimen F1 and its amplitude



(b) 试件F2损伤因子和损伤因子峰值  
(b) Damage factor of Specimen F2 and its amplitude



(c) 试件F3损伤因子和损伤因子峰值  
(c) Damage factor of Specimen F3 and its amplitude

图18 不同裂纹长度下混凝土损伤指标计算值

Fig.18 Calculated value of concrete damage index under different crack length

致混凝土微裂纹附近的弹性模量和刚度降低,这意味着在微裂纹处,同幅值宽频激励信号产生的位移场会更大,微裂纹表面的接触碰撞更强烈,由此产生的非线性也更加明显。同时还发现,预制裂纹尖端微裂纹扩展长度为  $0$  时,损伤因子并不为  $0$ ,这是由于混凝土材料的多相性导致混凝土结构中会存在许多微裂纹,从而产生非线性。

对比分析图11与图18可以发现,数值模拟的结果与试验结果的趋势基本一致,但横坐标阈值范围相差比较大。这可能是因为数值模拟中忽略了超声波在混凝土中的能量衰减,因此模拟中的调制信号比试验中的信号强,混凝土材料的阻尼以及胶凝材料的作用对超声波的衰减也有较大影响,所以模拟的损伤指标要比试验结果的损伤指标大很多。同时,数值分析并不能完全模拟出实际情况中的裂纹扩展形态,因此数值模拟中激励信号激发的混凝土非线性幅值与试验过程有所不同

### 3 结论

1) 提出了一种利用宽频非线性超声调制原理

检测混凝土扩展微裂纹的方法。

2) 利用试验和数值模拟对宽频激励下的混凝土结构扩展裂纹的响应信号特征进行了研究,并建立起裂纹扩展长度与非线性声场调制法中边带峰计数法所定义的损伤指标峰值之间的关系,发现损伤因子峰值均随着微裂纹扩展长度的增大而增大,证明了此方法检测混凝土扩展微裂纹的可行性。

3) 通过数值模拟发现,只要施加的激励信号能够激发微裂纹的非线性,则损伤因子幅值大小就与激励接收路径是否通过微裂纹无关。因此,微裂纹的走向、位置对本检测方法的有效性影响较小,证明了本方法对混凝土微裂纹扩展趋势实时动态监测的可行性。

### 参 考 文 献

- [1] 孟龙,黄瑞源,蒋东,等. 钢纤维的掺入对混凝土材料力学性能的优化[J]. 低温建筑技术, 2019, 41(6): 17-21.  
MENG Long, HUANG Ruiyuan, JIANG Dong, et al. Optimization of mechanical properties of concrete materials by incorporation of steel fibers[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2019, 41(6): 17-21.(in Chinese)
- [2] MCCALL K R, GUYER R A. A new theoretical paradigm to describe hysteresis, discrete memory and nonlinear elastic wave propagation in rock[J]. Nonlinear Processes Geophys, 1996, 3(2): 89-101.
- [3] MCCALL K R, GUYER R A. Equation of state and wave propagation in hysteretic nonlinear elastic materials[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1994, 99(B12): 23887-23897.
- [4] 陈婷. 水利工程施工中的混凝土裂缝控制[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(5): 165-166, 172.  
CHEN Ting. Concrete crack control in water conservancy project construction [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2020, 48(5): 165-166, 172.(in Chinese)
- [5] 夏雨,周诗博,龙嘉欣,等. 基于扩展有限元法的钢筋混凝土梁裂纹扩展的数值模拟[J]. 力学与实践, 2018, 40(3): 281-288.  
XIA Yu, ZHOU Shibo, LONG Jiixin, et al. Numerical simulation of crack growth of reinforced concrete flexural members based on XFEM[J]. Mechanics in Engineering, 2018, 40(3): 281-288.(in Chinese)
- [6] JHANG K Y. Nonlinear ultrasonic techniques for non-destructive assessment of micro damage in material: a review[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009, 10(1): 123-135.
- [7] LI X H, SHI D Y, YU Z H. Nondestructive damage testing of beam structure based on vibration response signal analysis[J]. Materials, 2020, 13(15): 3301.
- [8] 谈军,张权,王兵见,等. 基于超声导波非线性特征的钢绞线损伤检测研究进展[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(6): 104-107.  
TAN Jun, ZHANG Quan, WANG Bingjian, et al. Research progress in damage detection of steel strand based on nonlinear characteristics of ultrasonic guided wave [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technical), 2020, 16(6): 104-107.(in Chinese)
- [9] 周晓金. 无损检测在混凝土结构检测中的应用[J]. 广东建材, 2021, 37(4): 14-16.  
ZHOU Xiaojin. Application of nondestructive testing in concrete structure testing [J]. Guangdong Building Materials, 2021, 37(4): 14-16.(in Chinese)
- [10] DOMANESCHI M, NICCOLINI G, LACIDOGNA G, et al. Nondestructive monitoring techniques for crack detection and localization in RC elements [J]. Applied Sciences, 2020, 10(9): 3248.
- [11] XU B, JIANG P, LI C H. A review of research on non-destructive testing methods for steel corrosion[J]. Journal of Simulation, 2020, 8(3): 289-391.
- [12] XU C G, HE L, ZHOU S Y, et al. Evaluation of damage process of a coating by using nonlinear ultrasonic method[J]. Coatings, 2021, 11(4): 440.
- [13] 陈思坤. 基于扩展有限元的抗裂纤维封层阻裂效应及材料适应性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [14] 张晓东,丁勇,任旭春. 混凝土裂纹扩展过程模拟的扩展有限元法研究[J]. 工程力学, 2013, 30(7): 14-21, 27.  
ZHANG Xiaodong, DING Yong, REN Xuchun. Simulation of the concrete crack propagation process with the extended finite element method[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(7): 14-21, 27.(in Chinese)
- [15] ZHAO E F, LI B. Evaluation method for cohesive crack propagation in fragile locations of RCC dam using XFEM[J]. Water, 2021, 13(1): 58.
- [16] LIU P P, SOHN H. Damage detection using sideband peak count in spectral correlation domain[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 411: 20-33.
- [17] 陈小佳. 基于非线性超声特征的混凝土初始损伤识别和评价研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.



**第一作者简介:**许颖,女,1977年1月生,博士、副教授。主要研究方向为结构健康监测。曾发表《Laser active thermography for debonding detection in FRP retrofitted concrete structures》(《NDT&E International》2020, Vol.114)等论文。  
E-mail: cexyx@hotmail.com