

基于压电传感器的混凝土损伤检测数值模拟

齐宝欣, 张雨, 李佳诺, 贾连光

(沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要:该文基于 ABAQUS 有限元软件建立了压电陶瓷材料与混凝土的机-电多物理场耦合数值分析模型, 对压电波动法检测混凝土裂缝和弹性模量测定进行数值模拟, 探究其损伤识别的机理。采用 C3D8E 压电单元模拟压电陶瓷(PZT), 采用 C3D8R 单元模拟混凝土梁, 采用三维时域粘弹性人工边界消除边界对应力波的反射。模拟结果表明, 嵌入式 PZT 片激发的应力波包括纵波和剪切波, 其中剪切波的幅值比纵波大, 传播速度比纵波慢。以信号相对能量(D_i)作为损伤程度判别因子, 其值随着裂缝的深度增加而降低。将数值模拟计算的 D_i 和混凝土的动弹性模量(E_d)与试验结果进行对比, 符合较好, 说明有限元方法可以有效地解决该类问题。

关键词:压电陶瓷; ABAQUS; 数值模拟; 波动法; 损伤检测; 弹性模量

中图分类号: TN384

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.031

Numerical Simulation of Concrete Damage Detection Based on Piezoelectric Sensor

QI Baoxin, ZHANG Yu, LI Jianuo, JIA Lianguang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Based on the ABAQUS finite element software, a numerical analysis model of mechanical-electrical multi physics field for piezoelectric ceramics and concrete is established in this paper. A numerical simulation study on the concrete cracks detection and elastic modulus determination by the wave propagation method is carried out, and the mechanism of damage identification by piezoelectric wave method is investigated. The C3D8E piezoelectric elements are used to simulate the piezoelectric ceramic (PZT), and the C3D8R elements are used to simulate the concrete beam. The three-dimensional visco-elastic artificial boundary in time domain is adopted to eliminate the reflection of the stress wave on the boundary. The simulation results show that the stress waves excited by the embedded PZT patch are composed of the longitudinal wave and shear wave. The amplitude of the shear wave is larger than that of the longitudinal wave, and the propagation velocity is slower than that of the longitudinal wave. The relative energy of signal (D_i) is used as the discriminant factor of damage degree, and its value decreases as the depth of the crack increases. The relative energy of signal (D_i) and the dynamic modulus of elasticity (E_d) of the concrete obtained by numerical simulation are compared with the experimental data, and the results are in good agreement, indicating that the finite element method can effectively solve the problem.

Key words: piezoelectric material; ABAQUS; numerical simulation; wave propagation method; damage detection; elastic modulus

0 引言

近年来, 老旧钢筋混凝土建筑及桥梁等大型土木基础设施的损伤检测问题受到广泛关注。传统的检测方法如 X 射线、CT 扫描等, 对于大型结构、复杂建筑物成本较高, 有时甚至是无效的。压电陶瓷

材料如锆钛酸铅($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$, 简称 PZT), 由于其具有主动传感, 快速响应, 成本低, 易于实现等优势, 在混凝土损伤检测领域应用越来越多^[1]。

目前, 有关使用有限元软件模拟压电陶瓷进行损伤识别的研究并不多, 其中杜国锋等^[2-4]使用

收稿日期: 2017-09-26

基金项目: 沈阳建筑大学博士后基金重点资助项目(SJZUBSH201706); 沈阳市科学技术计划项目(17-231-1-89)

作者简介: 齐宝欣(1982-), 男, 吉林双辽人, 讲师, 博士, 主要从事结构健康监测的研究。E-mail: qibaoxin2005@163.com。

ABAQUS 模拟压电陶瓷材料,对智能骨料^[5]建立有限元模型,研究了动荷载作用下 PZT 片的力-电效应及智能骨料参数对灵敏度的影响。在此基础上利用智能骨料模型对混凝土柱进行应力监测,取得了良好的模拟结果。马尧^[6]模拟了压电悬臂梁,讨论了不同电压下的电压-位移变化关系。Hou 等^[7-8]结合试验和数值模拟,将压电智能骨料应用于对地震应力的监测,同时根据压电材料的本构方程,对 PZT 片作为传感器时应力-电压关系进行了理论推导。Markovic 等^[9]使用 ABAQUS 有限元软件,对基于压电波动法的埋入式压电陶瓷混凝土梁损伤识别系统进行模拟,分别建立了智能骨料和波传播的有限元模型,但其波传播模型的不足之处在于并未考虑压电材料与结构的耦合,且边界反射严重。

本文利用 ABAQUS 有限元软件对基于压电波动法的混凝土损伤识别进行数值模拟,建立压电陶瓷材料与混凝土的机-电多物理场耦合数值分析模型,探究应力波在介质中的传播与损伤识别机理,揭示应力波的本质,分析了裂缝对应力波的衍射作用。同时,考虑到边界对应力波的反射,在有限元模型中采用刘晶波等^[10]提出的三维时域粘弹性边界来降低边界的反射效应。将数值模拟结果与试验进行对比,验证了数值模拟的正确性。

1 基本理论

基于应力场和电场的耦合效应,在线弹性范围内,压电陶瓷材料的 h 型本构方程可写为

$$\mathbf{D} = \mathbf{d}\sigma + \lambda^s U \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{s}^U \sigma + \mathbf{d}^T U \quad (2)$$

式中: $\mathbf{D}$ 为电位移向量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为在应力场 σ 和电场 U 同时作用下产生的应变向量; λ^s 是在应力场为 0 ($\sigma = 0$) 的情况下测量的介电常数矩阵; $\mathbf{s}^U$ 为弹性柔顺常数矩阵; $\mathbf{d}$ 为压电应变系数矩阵, $\mathbf{d}^T$ 为其转置。若以机械应变 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和电场 U 作为主动变量,则将上述 h 型压电本构方程改写为 e 型方程:

$$\sigma = \mathbf{c}^U \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{e}^T U \quad (3)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{e}\boldsymbol{\varepsilon} + \lambda^e U \quad (4)$$

式中: $\mathbf{c}^U$ 是在恒定电场作用下计算的弹性刚度矩阵; λ^e 是在恒定应变情况下计算的介电系数矩阵; $\mathbf{e}$ 为压电应力常数矩阵, $\mathbf{e}^T$ 为其转置。将式(3)、(4)写成矩阵的形式为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & e_{15} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

在 ABAQUS 中有 2 种表达式来定义压电材料的本构方程。如果压电材料的弹性参数选择为应力的形式,则对应于式(3)、(4),用 ABAQUS 中的符号表示为

$$\sigma_{ij} = \mathbf{D}_{ijkl}^U \varepsilon_{kl} - \mathbf{e}_{ijk}^T U_j \quad (7)$$

$$q_i = \mathbf{e}_{ijk} \varepsilon_{jk} + \mathbf{D}_{ij}^e U_j \quad (8)$$

式中: σ_{ij} , ε_{kl} 分别为应力和应变分量; q_i , U_j 分别为电位移和电场分量; $\mathbf{D}_{ijkl}^U$, $\mathbf{D}_{ij}^e$ 分别为弹性常数矩阵和介电常数矩阵; $\mathbf{e}_{ijk}$ 为压电应力常数矩阵, $\mathbf{e}_{ijk}^T$ 为其转置。在 ABAQUS 中,双下标二阶张量记号 11, 22, 33, 12, 13, 23 分别对应矢量分量 1, 2, 3, 4, 5, 6。因此,式(5)、(6)用 ABAQUS 中的符号表示为

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ D_{2211} & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ D_{3311} & D_{3322} & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{1212} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{1313} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{2323} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{31} \\ 0 & 0 & e_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ e_{15} & 0 & 0 \\ 0 & e_{15} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$$

$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix}$

$=$

$\begin{bmatrix} 0 & 0 & e_{311} \\ 0 & 0 & e_{322} \\ 0 & 0 & e_{333} \\ 0 & 0 & 0 \\ e_{113} & 0 & 0 \\ 0 & e_{223} & 0 \end{bmatrix}$

$\cdot$

$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$

(9)

$\begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$

$=$

$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{113} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e_{223} \\ e_{311} & e_{322} & e_{333} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

$\cdot$

$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$

(10)

$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{bmatrix}$

$+$

$\begin{bmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ 0 & D_{11} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix}$

$\cdot$

$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix}$

(10)

若已知弹性常数矩阵 $\mathbf{c}$, 压电应力常数矩阵 $\mathbf{e}$, 相对介电常数矩阵 $\boldsymbol{\lambda}$, 对比式(5)、(6)和(9)、(10), 可以完成在 ABAQUS 中定义压电材料。本文对压电材料属性进行定义的 3 个矩阵分别为

$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 132 & 71 & 73 & 0 & 0 & 0 \\ 71 & 132 & 73 & 0 & 0 & 0 \\ 73 & 73 & 115 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 30 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 26 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 26 \end{bmatrix} \times 10^9 \text{ (Pa)}$

(11)

$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & -4.1 \\ 0 & 0 & 14.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 10.5 & 0 & 0 \\ 0 & 10.5 & 0 \end{bmatrix} \text{ (C/m}^2\text{)}$

(12)

$\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} 7.12 & 0 & 0 \\ 0 & 7.12 & 0 \\ 0 & 0 & 5.84 \end{bmatrix} \times 10^{-9} \text{ (F/m)}$

(13)

2 数值模拟

2.1 建立多物理场耦合模型

2.1.1 模型几何、材料参数

在 ABAQUS 中建立了内部嵌入 PZT 片形式的混凝土梁三维有限元模型, 图 1 为有限元模型示意图, 其中, PZT-A1 是驱动器, PZT-S1 是传感器。PZT 片尺寸为 12.7 mm×12.7 mm×0.3 mm, 混凝土梁尺寸为 406.4 mm×76.2 mm×101.6 mm。本

文借鉴断裂力学中创建裂纹的方法, 在模型中创建深度分别为 12.7 mm、25.4 mm、38.1 mm、50.8 mm、63.5 mm 的贯穿裂纹, 裂纹位置距离右端面 1/4 模型长度。由于压电陶瓷材料不是各项同性的, 因此, 在赋予材料属性后还要建立局部坐标系来指定其材料方向, 进而定义极化方向。本文中 PZT 片的极化方向及其坐标系如图 2 所示。模型的材料参数如表 1 所示。

图1 有限元模型示意图

图2 在 ABAQUS 中指定 PZT 片的极化方向

表1 材料物理参数

材料	弹性模量/Pa	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比
混凝土	19.889×10 ⁹	2 400	0.15
PZT-4	—	7 550	—

2.1.2 激励信号

PZT 片内置 (Embedded) 在混凝土中, 通过直接在 PZT 片的电极面上施加电压信号来模拟应力波的激发和接收。PZT-A1 的左侧电极面和 PZT-S1 的右侧电极面设置为 0 电势, PZT-A1 的右侧电极面输入电压信号, 输入的电压信号是汉宁窗调制的 4.5T(T 为周期)、100 kHz、幅值为 50 V 的正弦波, 如图 3 所示。

图3 激励信号

信号的表达式为

$$f(t) = 0.5[1 - \cos(2\pi t \times 100 \times 10^3 / 4.5)] \sin(2\pi t \times 100 \times 10^3) \quad (14)$$

2.1.3 阻尼

为了简化模型,本文将混凝土材料假定为具有 Rayleigh 阻尼的均匀弹性介质,其中包括质量和刚度阻尼,以补偿微观结构的影响。Rayleigh 阻尼是由阻尼矩阵 ζ 定义的质量矩阵 $\mathbf{M}$ 和刚度矩阵 $\mathbf{K}$ 的线性组合^[11]:

$$\zeta = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (15)$$

式中 α 和 β 分别为质量和刚度阻尼系数。 α 主要抑制低频部分, β 主要抑制高频部分。由于研究中使用的激励信号频率在高频率范围内 (>10 kHz), 因此 α 可忽略, 阻尼主要取决于 β , 本文中 $\alpha = 0.01$, $\beta = 1.5 \times 10^{-7}$ 。

2.1.4 网格划分与时间步长设置

有限元模型分析步的类型为动态隐式, 计算时间长度为 4×10^{-4} s。在历史变量输出中选择电势。采用有限元分析波动效应, 应根据激励信号的中心频率设置积分时间步长^[12], 同时若要精确地捕捉到波动效应, 网格尺寸不应过大^[13-14], 须同时满足:

$$l \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} \quad (16)$$

$$t \leq \frac{1}{20 f_{\max}} \quad (17)$$

式中: l 为网格最大尺寸; $\lambda_{\min}$ 为最小波长; t 为积分时间步长; $f_{\max}$ 为激励信号中心频率。本文中混凝土的网格尺寸设置为 2 mm, $t = 2 \times 10^{-7}$ s。网格划分情况如图 4 所示。

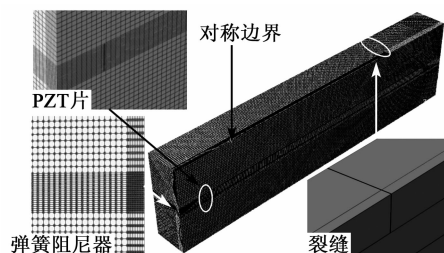


图4 无反射边界的混凝土梁有限元模型

2.1.5 粘弹性边界

为了消除模型边界对应力波的反射, 本文采用刘晶波等^[10]提出的三维粘弹性人工边界对到达边界的应力波进行吸收。粘弹性边界是在模型边界处设置相应的弹簧及阻尼器来实现。当弹性波传播到模型边界时, 弹性波的绝大部分能量会被弹簧和阻尼器吸收。三维粘弹性人工边界等效物理系统的弹簧刚度及阻尼系数分别为

$$K_1 = K_2 = \frac{2G}{R} \sum_{i=1}^I A_i \quad (18)$$

$$C_1 = C_2 = \rho v_s \sum_{i=1}^I A_i \quad (19)$$

$$K_3 = \frac{4G}{R} \sum_{i=1}^I A_i \quad (20)$$

$$C_3 = \rho v_p \sum_{i=1}^I A_i \quad (21)$$

式中: K_1 、 K_2 、 K_3 分别为切向和法向的弹簧刚度系数; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为切向和法向的阻尼系数; R 为人工边界(粘弹性边界)与激励源中心的距离; v_s 、 v_p 分别为弹性介质的剪切波速度和纵波速度; G 为弹性介质的剪切模量; $\sum A$ 为人工边界上节点代表的面积。

采用 C3D8R 三维应力单元模拟混凝土梁, C3D8E 压电单元模拟 PZT 片。由于所研究的混凝土梁具有对称性, 因此只对 1/2 体积进行建模计算。

2.2 数值模拟结果

2.2.1 损伤检测与传播机理

应力波在混凝土中传播的波场快照如图 5 所示。由图可见, 埋入式压电陶瓷片激发的应力波包括纵波和剪切波, 其中纵波传播速度较快, 幅值较小, 剪切波传播速度较慢, 幅值较大。这是因为 PZT 片埋在混凝土中会同时发生沿厚度方向和长度方向的伸缩振动, 这两种振动的耦合会导致既产生纵波又产生剪切波。此外, 埋入式 PZT 片的波场分布为球状, 应力波在混凝土梁中是以球面波的形式传播。

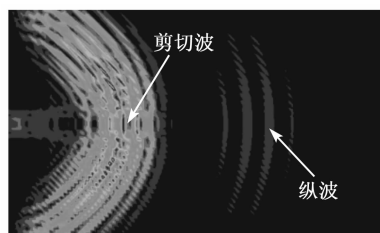


图5 应力波传播快照

图 6 为数值模拟得到的应力波信号时程曲线。由图可见, 信号中有纵波和剪切波, 其幅值、速度关系均与图 5 波场快照结果吻合。此外, 随着裂缝深度的增大, 接收信号的幅值逐渐减小, 信号幅值与裂缝深度有明显的正相关性。这说明裂缝的存在阻挡了信号的传播, 因此可通过信号的幅值来判断裂纹深度的变化。

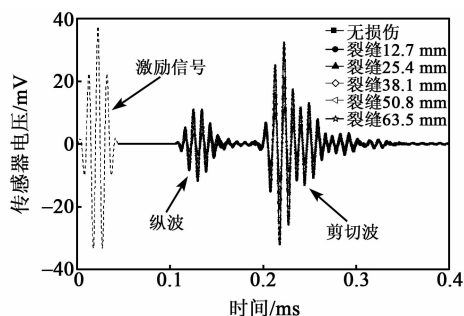


图6 数值模拟的应力波信号

通常试验中采用纵波进行损伤识别^[15],但由于纵波幅值小,试验中易被干扰信号覆盖(见图6),故文献[16]采用剪切波进行损伤识别。图7为文献[16]中试验测得的剪切波信号曲线。由于本文有限元模型即是对文献[16]中的试验进行模拟,对比图6、7中剪切波的传播时间,发现数值模拟结果与试验结果基本一致。随着裂缝深度的增加,接收信号的幅值逐渐减小。

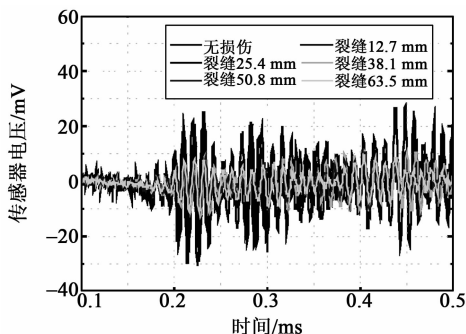


图7 试验中传感器输出应力波信号

2.2.2 基于信号能量的损伤程度判定方法

信号的幅值代表着信号的能量值大小,因此,可通过计算信号的能量值作为损伤程度的判别指标^[17]。离散信号的能量表达式可写为

$$E_s = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2 \quad (22)$$

式中: $x(n)$ 为信号对应的离散序列, n 为采样点。通常,将健康状态下的能量 E_h 作为基准信号, E_i 为结构处于某一损伤状态下的信号能量,则归一化的信号能量可表示为

$$D_i = \frac{E_i}{E_h} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} |x_i(n)|^2}{\sum_{n=0}^{\infty} |x_h(n)|^2} \quad (23)$$

式中 $x_h(n)$ 和 $x_i(n)$ 分别为结构健康状态和任意损伤状态下传感器采集到的离散信号。显然, D_i 的取值范围为 $0 \sim 1$, $D_i = 1$ 表示结构处于健康状态, $D_i = 0$ 表示结构处于功能完全失效状态。采用

MATLAB 计算的归一化信号能量值与试验结果对比如图8所示。

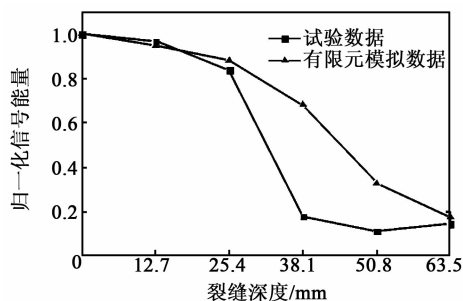


图8 数值模拟结果与试验对比

由图9可看出,随着裂纹深度的增加,数值模拟与试验得到的归一化能量值均逐渐减小,表明采用归一化信号能量值可以很好地反应出损伤的存在及损伤程度,验证了有限元模型的正确性。但是,在裂缝深度为 38.1 mm 的情况下,试验得到的归一化信号能量值骤然下降,与数值模拟结果缓慢变化不同,这是因为相较于试验过程有限元模拟较理想化,忽略了混凝土中骨料、气孔等成分对应力波传播的影响,因此,数值模拟中裂缝对应力波的衍射作用比试验中强,导致模拟中虽然部分应力波被裂缝阻挡,但也有很大一部分通过裂缝尖端衍射过去,致使数值模拟中信号能量高于试验结果。

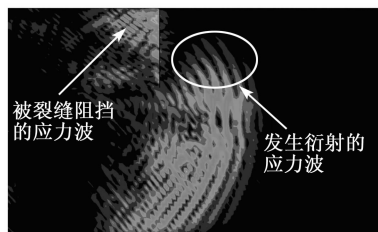


图9 应力波与裂纹相互作用

2.2.3 弹性模量测定

信号传播时间是指从信号发射到信号被接收所经历的时间间隔(TOF),可以作为衡量模拟准确性的重要指标。 TOF 可以通过激励信号和接收信号的峰-峰值确定。由图7可得 $TOF = 191 \times 10^{-6}$ s, 则剪切波的传播速度为

$$v_s = L/TOF \quad (24)$$

式中 L 为传感器与驱动器之间的距离。根据式(24)算出剪切波速度为 1 861.78 m/s。已知剪切波的速度,再根据经典弹性波方程即可计算出材料的动弹性模量。在各向均匀同性且无限大固体介质中弹性模量与剪切波速的关系^[18]为

$$E_d = 2\rho v_s^2(1 + \nu) \quad (25)$$

式中: E_d 为介质的动弹性模量; ρ 为介质密度; ν 为

泊松比。由表1可知,混凝土的泊松比为0.15,密度为 $2\,400\text{ kg/m}^3$,则动弹性模量的数值模拟结果为 $19.133\,56\times 10^9\text{ Pa}$ 。

表1中混凝土的弹性模量为试验测试结果,与数值模拟结果相比,二者相对误差仅为3.8%。结果表明,通过数值模拟可以较准确地计算出介质材料的弹性模量^[19]。

3 结论

本文使用有限元软件 ABAQUS 建立了 PZT 片与混凝土的机-电多物理场耦合模型,对 PZT 片在混凝土梁中激发、接收应力波进行了模拟。研究了应力波在介质中的传播过程及压电波动法损伤检测技术的机理,得出结论如下:

1) 嵌入式 PZT 片激发的应力波本质上包括纵波和剪切波。纵波幅值小,速度快;剪切波幅值大,速度慢,且应力波在介质中是以球面波的形式向远处传播。

2) 通过对应力波信号的幅值和能量进行分析,建立损伤指标可以准确地判断出损伤的存在及损伤程度。

3) 损伤识别和弹性模量测定的数值模拟结果与试验结果对比,二者符合较好,说明建立的有限元模型可以有效地进行损伤识别和弹性模量测定。

参考文献:

- [1] SONG G, GU H, MO Y L. Topical review: Smart aggregates: multi-functional sensors for concrete structures—a tutorial and a review[J]. *Smart Materials & Structures*, 2008, 17(3): 033001.
- [2] 杜国锋, 何明星, 吴方红, 等. 动荷载作用下的智能骨料力电效应仿真分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(4): 572-576.
DU G, HE M, WU F, et al. Simulation analysis of mechano-electric effect of smart aggregate under dynamic loading[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(4): 572-576.
- [3] 杜国锋, 刘向东, 何明星, 等. 基于压电陶瓷的混凝土柱应力监测模拟研究[J]. *混凝土*, 2016(9): 29-33.
DU Guofeng, LIU Xiangdong, HE Mingxing, et al. Simulation study on dynamic stress monitoring with embedded piezoceramic for concrete column[J]. *Concrete*, 2016(9): 29-33.
- [4] 何明星, 管文强, 刘向东. 基于 ABAQUS 的压电智能骨料参数对灵敏度系数的影响研究[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2016, 13(4): 44-47.
HE Mingxing, GUAN Wenqiang, LIU Xiangdong. Influence of piezoelectric smart aggregate parameters on sensitivity coefficient based on ABAQUS[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2016, 13(4): 44-47.
- [5] SONG G, GU H, MO Y L, et al. Health monitoring of a concrete structure using piezoceramic materials[J]. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2005, 5765: 108-119.
- [6] 马尧. 基于 ABAQUS 的压电悬臂梁有限元仿真分析[J]. *吉林化工学院学报*, 2014(7): 49-52.
- [7] HOU S, ZHANG H B, OU J P. A PZT-based smart aggregate for seismic shear stress monitoring [J]. *Smart Materials & Structures*, 2013, 22(6): 065012.
- [8] HOU S, ZHANG H B, OU J P. A PZT-based smart aggregate for compressive stress monitoring[J]. *Smart Materials & Structures*, 2012, 21(10): 105035.
- [9] MARKOVIC N, NESTOROVIC T, STOJIC D. Numerical modeling of damage detection in concrete beams using piezoelectric patches[J]. *Mechanics Research Communications*, 2015, 64: 15-22.
- [10] 刘晶波, 王振宇, 杜修力, 等. 波动问题中的三维时域粘弹性人工边界[J]. *工程力学*, 2005, 22(6): 46-51.
- [11] SONG F, HUANG G L, KIM J H, et al. On the study of surface wave propagation in concrete structures using a piezoelectric actuator/sensor system[J]. *Smart Materials & Structures*, 2008, 17(5): 055024.
- [12] 李婷. 应力与材料构成对压电纵波在混凝土中的传输影响研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [13] 欧阳凯. 基于瑞利波的材料表面缺陷深度检测数值研究[D]. 深圳: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [14] 原志杰. 基于瑞利波法对混凝土裂缝检测的数值研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [15] HU B, KUNDU T, GRILL W, et al. Embedded piezoelectric sensors for health monitoring of concrete structures[J]. *ACI Materials Journal*, 2013, 110(2): 149-158.
- [16] QIAO P, FAN W, CHEN F. Material property assessment and crack identification of recycled concrete with embedded smart cement modules[J]. *Proc Spie*, 2011, 7981(8): 765-768.
- [17] 孙威, 阎石, 焦莉, 等. 基于压电波动法的混凝土裂缝损伤监测技术[J]. *工程力学*, 2013, 30(b06): 206-211.
- [18] LIM Y Y, KWONG K Z, LIEW W Y H, et al. Non-destructive concrete strength evaluation using smart piezoelectric transducer—a comparative study [J]. *Smart Material Structures*, 2016, 25(8): 085021.
- [19] 何玉阳, 胡文军, 陶俊林, 等. 一种三维混凝土分离式建模方法[J]. *兵器装备工程学报*, 2016(5): 158-160.