EFITによるコンクリート中の弾性波のモデル化と伝搬特性の評価

愛媛大学大学院　学生員　○牛尾　賢司,　愛媛大学大学院　学生員　徳永　淳一
愛媛大学大学院　正会員　中畑　和之,　愛媛大学大学院　正会員　大賀水田生

弾性波を用いてコンクリート内部の劣化状況を非破壊的に評価する取り組みが近年精力的に行われている．このとき，コンクリート中の波動伝搬の特性が予め把握できれば，非破壊検査における精度の向上に大いに寄与すると考える．コンクリートなどの非均質材料中の波動場を数値的に求める手法として，動弾性有限積分法[1](Elastodynamic Finite Integration Technique： EFIT) が提案されている．しかしながら，これまでの研究ではコンクリートを構成する材料 (骨材・気泡等) は人工的に配置された数値モデルが使われており，コンクリートの分布形態を厳密にモデル化した研究例は見あたらない．そこで，本研究では実際のコンクリート供試体の写真から数値モデルを作成するイメージベースモデリング[2]を EFIT に組み合わせることによって，コンクリート中における介在物の配置を考慮した波動伝搬解析法を開発した．本イメージベースモデリングでは，デジタル画像の 1 画素 (ピクセル) を EFIT の 1 セルと整合させるため，解析対象の画像さえ得ることができれば，数値モデルの作成を画像処理により行うことができる．本概要集では，鉄筋コンクリート中を伝搬する波動の解析例を示すが，講演会当日はコンクリート中の弾性波の伝搬特性について述べる．

1. EFIT による離散化

x_1–x_2 平面において，x_3 軸方向に偏向しながら伝搬する SH 波を考える．このとき，x_3 軸方向の粒子速度を v_3，せん断応力を τ_{31},τ_{32} とすれば，SH 波は次の釣り合い式を満足する．

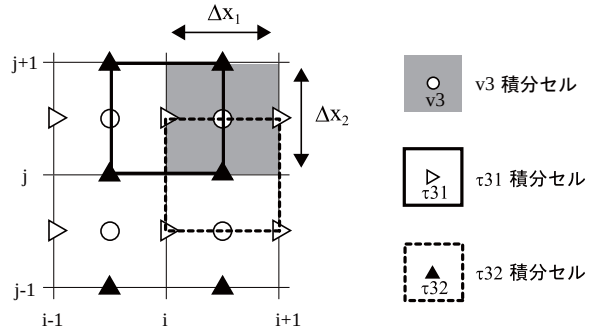
$$\rho(\boldsymbol{x})\dot{v}_3(\boldsymbol{x},t)=\frac{\partial\tau_{31}(\boldsymbol{x},t)}{\partial x_1}+\frac{\partial\tau_{32}(\boldsymbol{x},t)}{\partial x_2} \tag{1}$$

また，構成式は次の 2 つの式で表される．

$$\frac{\dot{\tau}_{31}(\boldsymbol{x},t)}{\mu(\boldsymbol{x})}=\frac{\partial v_3(\boldsymbol{x},t)}{\partial x_1},\quad \frac{\dot{\tau}_{32}(\boldsymbol{x},t)}{\mu(\boldsymbol{x})}=\frac{\partial v_3(\boldsymbol{x},t)}{\partial x_2} \tag{2}$$

ここで，ρ は密度，μ はせん断弾性係数である．上式の $\dot{(\ )}$ は時間 t に関する偏微分 $(\partial/\partial t)$ を表す．

EFIT のキーとなるポイントは，式 (1) と (2) を適当な大きさの四角形領域で積分し，これを離散化することである．いま，四角形の積分領域を図–1 のように設定し，離散化を行うと[3]，



図– 1　2 次元面外問題における v_3，τ_{31}，τ_{32} の配置図

$$(v_3)^{k+1}_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}=\Delta t\frac{(\tau_{31})^{k+\frac{1}{2}}_{i+1,j+\frac{1}{2}}-(\tau_{31})^{k+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}}{\rho_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}\Delta x_1}+\Delta t\frac{(\tau_{32})^{k+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j+1}-(\tau_{32})^{k+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j}}{\rho_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}\Delta x_2}+(v_3)^{k}_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} \tag{3}$$

$$(\tau_{31})^{k+\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}=(\tau_{31})^{k-\frac{1}{2}}_{i,j+\frac{1}{2}}+\frac{\bar{\mu}_{i,j+\frac{1}{2}}\Delta t}{\Delta x_1}\left\{(v_3)^{k}_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}-(v_3)^{k}_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}\right\} \tag{4}$$

$$(\tau_{32})^{k+\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j}=(\tau_{32})^{k-\frac{1}{2}}_{i+\frac{1}{2},j}+\frac{\bar{\mu}_{i+\frac{1}{2},j}\Delta t}{\Delta x_2}\left\{(v_3)^{k}_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}-(v_3)^{k}_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}\right\} \tag{5}$$

となる．上式中の Δx_1 と Δx_2 は，それぞれ x_1 と x_2 方向のセル長を示し，下付き文字 i と j はそれぞれ x_1 と x_2 方向における基準位置からの節点番号を示している．EFIT では，時間 t については中心差分で近似しており (Δt は時間幅)，v_3 は整数次，τ_{31} と τ_{32} は半整数次の時間ステップで定義している．SH 波動場では，材料定数は v_3–セルで定義されるものとし，τ_{31} および τ_{32}–セルのように v_3–セルをまたぐ場合には，以下のように材料定数を分担する．

$$\frac{1}{\bar{\mu}_{i,j+\frac{1}{2}}}=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\mu_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}+\frac{1}{\mu_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}\right)$$
$$\frac{1}{\bar{\mu}_{i+\frac{1}{2},j}}=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\mu_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}}}+\frac{1}{\mu_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}}}\right) \tag{6}$$

式 (3)～(5) より，ある整数次の時間ステップ k で求

キーワード：EFIT，コンクリート，波動伝搬，数値解析
〒 790-8577　松山市文京町 3,　TEL: 089-927-9812, FAX: 089-927-9840，E-mail: nakahata@dpc.ehime-u.ac.jp

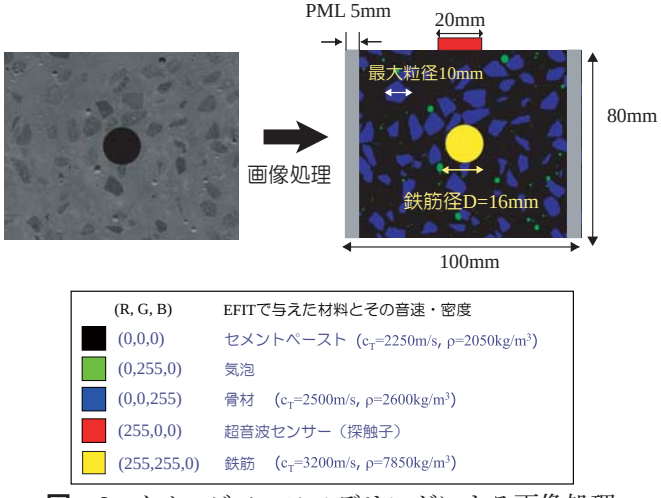
まった v_3 を用いて半整数次の時間ステップ $k+\frac{1}{2}$ における τ_{31} と τ_{32} が求まることになり，この計算を交互に実行することで順次解が求まる．

2. 解析モデル

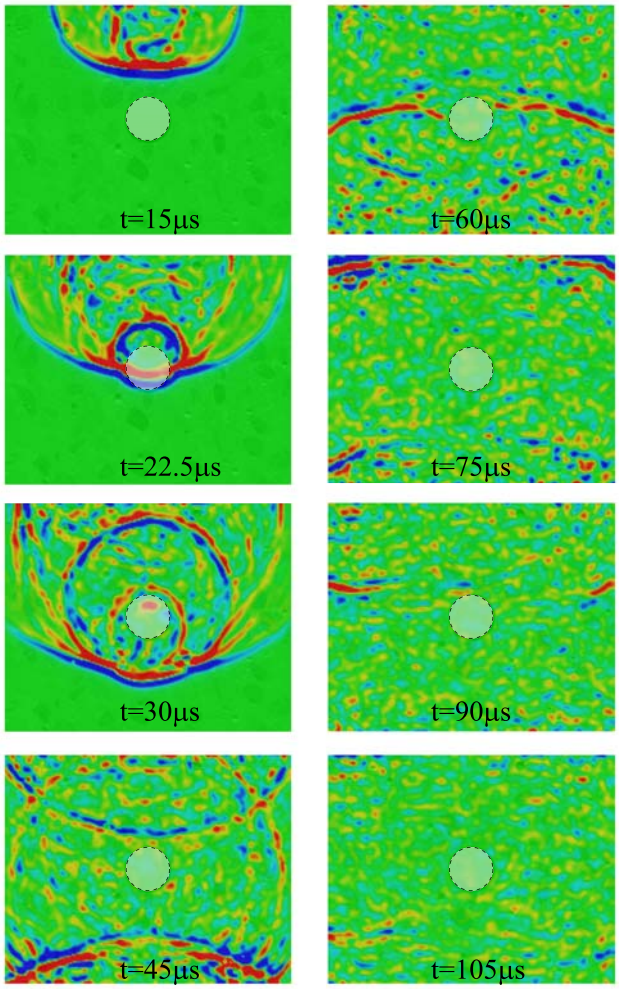
本論文では，コンクリートの断面写真から解析モデルを作成する．図–2 の左側の図は，実際に研究室で作成した鉄筋コンクリート供試体の断面写真である．この供試体は横 100mm，縦 80mm であり，全体に対する骨材の体積分布率は 30%，骨材の最大粒径は 10mm，鉄筋の直径 D は 16mm である．各材料の音速 c_T および密度 ρ は，セメントペースト (c_T=2250m/s，ρ=2050kg/m^3)，骨材 (c_T=2500m/s，ρ=2600kg/m^3)，鉄筋 (c_T=3200m/s，ρ=7850kg/m^3) とした．この写真をスキャナで読み込み，BMP 画像に変化した後，デジタルイメージ編集ソフト等を用いて，セメントペースト (黒)，気泡 (緑)，骨材 (青)，鉄筋 (黄色) の 4 種類に識別する．これを，24bpp（ピクセル当たり 8×3=24 ビット）でエンコードされた RGB カラーモデルで表すと，黒は (R,G,B)=(0, 0, 0)，緑は (0, 255, 0)，青は (0, 0, 255)，黄は (255,255,0) となる．このように色分けされたピクセルのサイズと，材料定数を定義するセル長を等しくし，色ごとに材料定数を定義して，入力データを作成する．

3. 弾性波伝搬シミュレーション

ここでは，送信する SH 波の中心周波数は 500kHz，セル長は Δx=0.025mm，時間間隔は Δt=0.005μs，時間ステップ数は 21000 とした．なお，モデルの両端に 5mm の吸収境界を設けており，外側境界による反射波が発生しないようにしている．図–3 は鉄筋コンクリート中の波動場のスナップショットを示したものである．弾性波がコンクリート中を伝搬すると，波面が通過した後に骨材同士の多重散乱によって波動が拡散しているのがわかる．鉄筋に弾性波が到達すると，入射波に対して位相の反転した散乱波が発生する．また，底面で反射した波動が上方に伝搬していくが，骨材分布の粗密に依存して波面自体も局所的に崩れて減衰していくのがわかる．



図– 2 イメージベースモデリングによる画像処理



図– 3 鉄筋コンクリート中を伝搬する SH 波

4. 結論

本研究では，写真等のデジタル画像を元に入力データを作成し，これを動弾性有限積分法 (EFIT) に適用することによって，コンクリートの介在物の分布形態を正確にモデル化した波動伝搬解析法を示した．非均質材料中の波動場の特徴である，波動の拡散と減衰をシミュレーションすることができた．

参考文献

1) F. Schubert: Numerical time-domain modeling of linear and nonlinear ultrasonic wave propagation using finite integration techniques-theory and applications, *Ultrasonics* Vol.42, pp.221-229, 2004.
2) 永井学志，山田貴博，渡邉勝彦：不連続要素と等価面の再構成手法を用いた粒子分散型 2 相材料の 3 次元イメージベース有限要素モデリング，日本機械学会論文集 (A 編)，Vol.70, pp.84-91, 2004.
3) 中畑和之，木本和志，廣瀬壮一: 動弾性有限積分法を用いた波動伝搬解析のためのイメージベースモデリング，計算数理工学論文集，Vol.7(2), pp.267-272, 2008.