

多重反射によるコンクリート構造物内部欠陥検知の理論的検討

THEORETICAL EXAMINATION ON THE DETECTION OF INTERNAL DEFECT IN CONCRETE SLAB BY FREQUENCY CHANGES IN FLUTTER ECHO

○山下健太郎 境 友昭 村田 浩一 極檀 邦夫
KENTARO YAMASHITA TOMOAKI SAKAI KOUICHI MURATA KUNIO GOKUDAN
(株)東洋計測リサーチ アプライドリサーチ(株) (一社)iTECS 技術協会
Toyo survey and research Inc. Applied Inc. iTECS Association

概 要

衝撃弾性波法では、多重反射周波数の変化、すなわち見かけの弾性波速度の変化を利用してコンクリート内部の欠陥を検出する方法が用いられている。周波数の低減率と内部欠陥の大きさの間には関連性があることは知られているが、定量的な検証事例は少ない。本論では、1次元弾性体をモデルとして、入力信号の周波数、内部欠陥の大きさ、位置が、多重反射周波数に与える影響を波動理論の数値計算によって検証した結果について報告する。

キーワード 非破壊試験, コンクリート構造物, 衝撃弾性波法, 弾性波速度

1. まえがき

衝撃弾性波法では、板状コンクリート構造物の厚さ方向に対する波動の多重反射(Flutter Echo)によって生じる卓越周波数を元に、構造物の厚さ、あるいは弾性波速度の測定を行う。内部欠陥がある場合に生成される周波数については、大別して二つの考え方があり、Impact Echo法¹⁾では、内部欠陥と測定面の間での多重反射に起因する周波数が発生する、としている。これに対し、iTECS技術²⁾では内部欠陥によって見かけの弾性波速度が低下する、としており、両者には基本的な考え方の違いがある。見かけの周波数低下に対して、波動が内部欠陥を迂回することによる伝搬経路の延伸を原因とする考え方もある。本論では、内部欠陥に対する迂回経路が存在しない1次元弾性体(棒モデル)を対象とし、波動方程式の数値計算によって1次元棒の振動速度応答を求め、これを測定波形として衝撃弾性波法と同様に周波数解析を行った結果について報告する。また、実際の棒を対象として、棒の細長比を変えて、透過方向の弾性波速度と多重反射の弾性波速度を比較した結果についても考察する。

2. 数値計算の方法と結果

2.1 波動方程式の数値解法

波動方程式の数値解法は、境³⁾の方法を用いた。棒の打撃力入力端は、波動に関する自由端とし、個々に打撃速度波形が印加されることとした。棒の先端は自由端であり、内部欠陥は、局所的に棒断面の機械インピーダンス値を小さくすることによって実現した。応答波形は、棒の入力端の振動速度波形として算出した。数値計算での時間間隔は、 $1\mu s$ とし、物性としての縦弾性波速度は $4,000m/s$ とした。棒の長さは $400mm$ とし、計算時間は全体で $2ms$ とした。周波数分析は、フーリエ積分によって行い、周波数間隔は、 $10Hz$ から $10Hz$ ステップで $20kHz$ まで、とした。入力信号の波長は、棒の長さを基準とし、その約 5% から 250% まで、 5% ステップとして設定した。

2.2 計算波形

数値計算によって求めた応答波形の一例を図1に示す。波形は時間と共に減衰する傾向を示すが、これは数値計算において0.1%のヒステリシスを考慮したためである。この計算では、入力波長を棒の長さの2倍としており、これは両端自由端の場合の共振周波数での波長に相当する。

2.3 応答周波数

図2は、棒の上端から25%の位置に幅1%、断面欠損率50%の欠陥がある場合の周波数スペクトルを示している。計算では、入力波長を棒の長さの5%から200%まで変化させている。図から明らかなように、生成されるスペクトルは、棒の基本周波数5kHzに対し、10kHz及び15kHzの高調波の3種であり、内部欠陥と打撃端の間での多重反射による共振周波数(20kHz)の成分はほとんど生成されていない。また、基本周波数の持つパワーと比較すると高調波成分のパワーは弱く、入力波長が棒の長さ以上となると、基本周波数が卓越し、内部欠陥に対応する周波数は観測されないレベルとなる。

2.4 欠陥位置と周波数の関係

内部欠陥の位置が異なると、卓越周波数に変化が生じることは前回も報告しているが⁴⁾、より詳細な計算を行った。図3に示されるとおり、欠陥が棒の中央にある場合に、最も周波数の低減率が高く、この場合の低減率は約2%である。このような周波数低減(見かけの弾性波速度の低減)が生じる原因として、棒の断面欠損部をバネ、その上下の棒部を質量とする共振振動系の存在が考えられる。図3破線には、欠陥位置とその共振周波数の関係を示しているが、関数の形が両者で異なり、欠陥部をバネとした振動系のみで、周波数低減を説明することは難しい。

2.5 欠損率と周波数低減の関係

図4は、棒の中央部にある幅1%の断面欠損率と卓越周波数の関係を示しているが、断面欠損率が90%を越えると、周波数の低減が著しくなることがわかる。

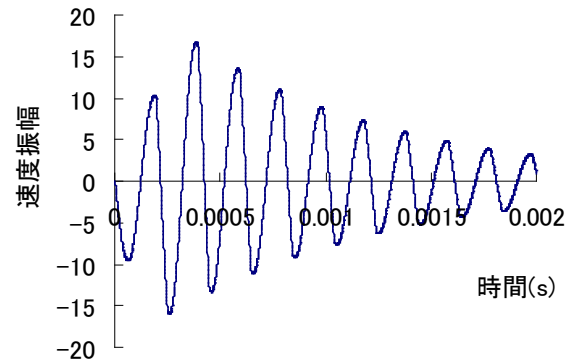


図1 数値計算による速度応答波形

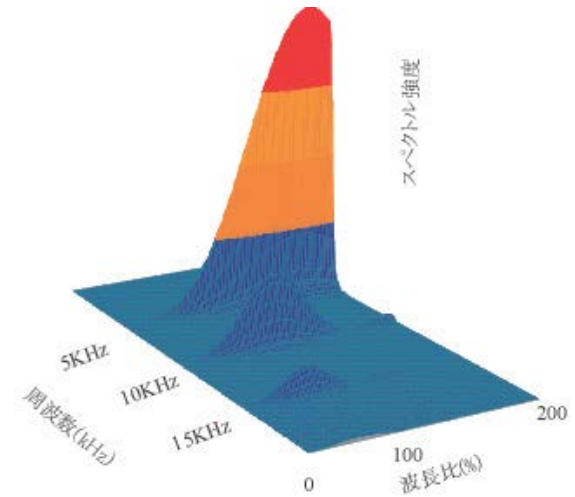


図2 入力波長と周波数スペクトルの関係

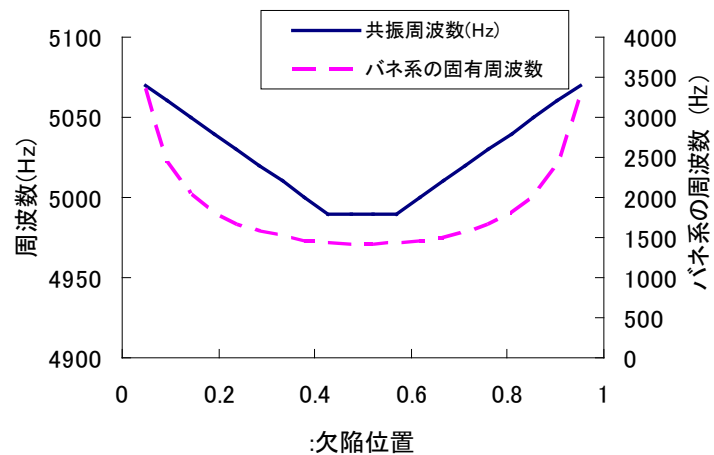


図3 欠陥位置と卓越周波数の関係

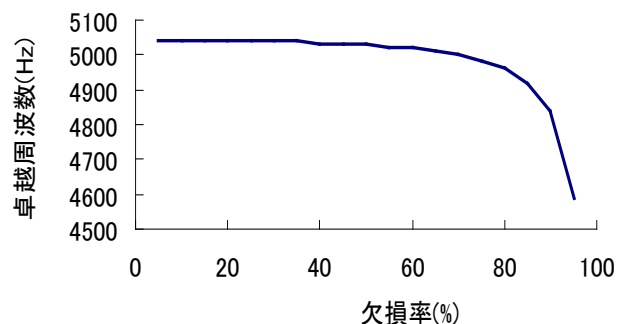


図4 欠損率と卓越周波数の関係

2.6 欠陥の幅(広がり)と周波数低減の関係

図5は、中央部の断面欠損部の長さ(幅)と卓越周波数の関係を示すものである。断面欠損部の長さは、実構造物の場合には欠陥の深さ方向の広がりに相当すると考えている。欠陥幅が大きくなるに従って、周波数は低下し、断面欠損長さが棒の長さの10%に及ぶと、周波数は約4.8%低下している。

2.7 数値計算結果のまとめ

数値計算では、棒の物性としての縦弾性波速度は4,000m/sとしている。棒の長さが400mmであるから、棒の多重反射に起因する固有振動数は5kHzである。実際の計算では、接点数を100としており、この場合の要素数は99であり、数値計算上の固有振動数は5050Hzとなる。周波数と弾性波速度の関係は、棒の長さを D 、縦弾性波速度を V_p とすると、

$$f = \frac{V_p}{2D} \quad (1)$$

であり、棒の長さが一定であれば、周波数と縦弾性波速度は比例関係にある。つまり、ここで観測された周波数の低下は、弾性波速度の低下を意味しており、物性としての縦弾性波速度との混乱をさけるため、多重反射の卓越周波数から計算された弾性波速度をここでは「見かけ」の弾性波速度としている。計算結果が示すように、内部欠陥に相当する断面欠損があると、見かけの弾性速度は必ず低下している。すなわち、小賭の弾性波速度が低下していれば、その測定における波動の通過経路には必ず内部欠陥が存在すると言える。また、内部欠陥と打撃入力端との間での多重反射による卓越周波数はこの計算の中では観測されていない。仮に発生していたとしても、波動が棒の先端位置まで到達して多重反射が成立している限り、そのパワー比があまりにも小さく、実質的に観測されない可能性も考えられる。いずれにしろ、Impact Echo法やSIBIE法⁵⁾が前提とするような、欠陥部との多重反射による単一スペクトルの生成には疑問があり、iTECS法が説明するような見かけの弾性波速度の低下による内部欠陥探査手法の法が原理的にも現実的であると言える。

3. 棒の細長比と見かけの弾性波速度

3.1 数値計算の方法

コンクリートの試験に使用される円柱供試体は、有限の円形断面を持つ1次元状柱体とみなすことができる。この形状の場合、打撃面に発生した波動は、直接底面に向かうだけでなく、柱の側面で反射する経路を経て、底面に向かう経路もとる。すなわち、多重反射する波動の場合、インパルス応答は、単一のパルスではなく、柱状体内で閉じた経路長に相当する時間遅れを持つパルストレインとして表現される。底面で観測される波形は、

$$y(t) = \int_0^{\infty} x(t-\tau)h(\tau)d\tau \quad (2)$$

となる。ここで、 τ は遅れ時間、 h はインパルス応答である。今、柱状体の側面で斜め入射して反射する波動は、鉛直成分としてその余弦値を持ち、伝達する波動の振幅は、その余弦値の反射回数のべき乗に比例するとする。要するに、側面での反射回数が多い経路を辿る波動は、その減衰が大きい、

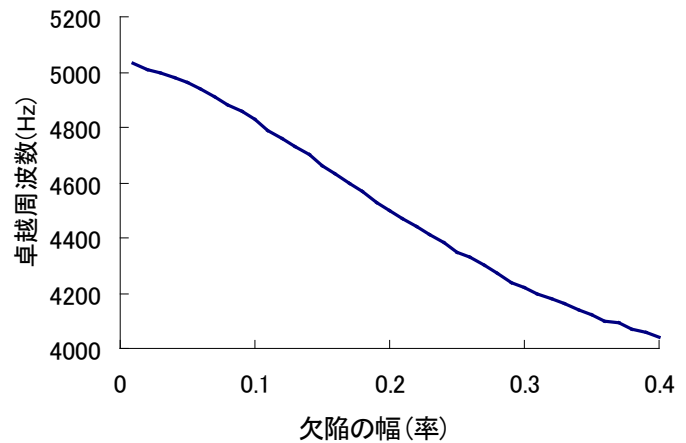


図5 欠陥の大きさ卓越周波数の関係

という仮定である。図6は、数値計算による見かけの弾性波速度の変化を柱状体の細長比との関係で示すものである。図では細長比を円柱の高さに対する直径の比としており、値が大きいくほど、より扁平な形状を意味する。図に示されるとおり、形状が扁平になるほど、見かけの弾性波速度は低下する傾向を示す。通常の円柱供試体は、細長比0.5に相当し、この場合の見かけの弾性波速度は、物性としての縦弾性波速度の約85%となる。

図7は、ABS樹脂の円柱を使用して多重反射での見かけの弾性波速度の変化を実験的に求めたものである。実験でも細長比が大きくなると、見かけの弾性波速度が低下する傾向を示し、細長比0.5では、弾性波速度は、約90%となっている。実験と数値計算での細長比と見かけの弾性波速度の関係は、同じ傾向を示しており、側面反射波の影響によって、見かけの弾性波速度が低下することが示される。なお、図7中の凡例は、波動の入力に使用した鋼球の径を示している。

4. まとめ

衝撃弾性波法によるコンクリート構造物中の欠陥の探査方法について、1次元モデルを用いた波動方程式の数値解法を用いて検証を行った。この結果、波動の伝搬経路上に存在する内部欠陥に起因する見かけの弾性波速度の低下をキーとして内部欠陥を検知する方法の理論的根拠が示された。同時に、波動を全反射するような巨大な内部欠陥でない限り、内部欠陥と測定面の間での波動の多重反射による共振周波数は、発生したとしても振幅が小さくて、数値計算でも検知が難しい程度であった。

また、柱状供試体では、その細長比によって見かけの弾性波速度が変化することが数値計算及び実験によって確認された。このことは、弾性波速度の較正試験を柱状供試体を用いて行う場合、値の取り扱いに注意が必要であることを示唆するものである。

参考文献

- 1) Mary J. Sansalone William B. Streett ;IMPACT-ECHO Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry 1997
- 2) 尾場瀬宏美, 極壇邦夫ら: 動的FEM 解析によるコンクリート内部欠陥探査のメカニズムに関する研究, コンクリート工学年次論文集 第27巻
- 3) 境 友昭 波動方程式の杭打ち問題への応用に関する研究, 1990年1月
- 4) 山下健太郎, 境友昭ら: 微小欠陥が多重反射の周波数・波形に及ぼす影響 第66回土木学会年次講演概要集
- 5) 村 芳弘, 小坂 浩二, 大津 政康, 内田 昌勝: SIBIE によるコンクリート内部欠陥評価に関する数値解析 第57回土木学会年次学術講演会講演概要集 他

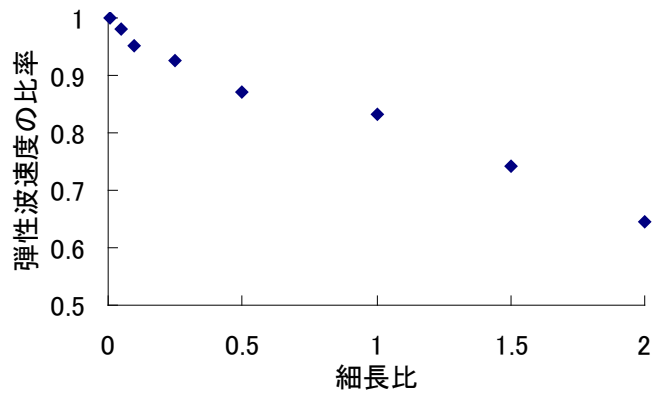


図6 柱状体の細長比と弾性波速度(数値計算)

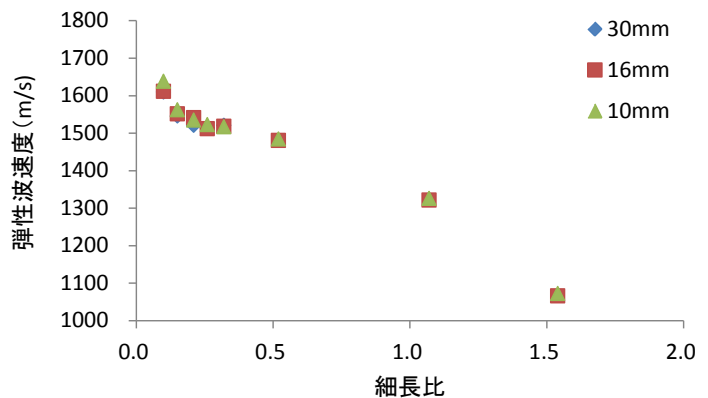


図7 柱状体の細長比と弾性波速度(実験値)