

弾性波の位相変化に着目した内部欠陥からの反射波の検出

(株) 東洋計測リサーチ 正会員 ○山下健太郎
(株)大進コンサルタント 正会員 炭谷 浩一
アプライドリサーチ (株) 正会員 境 友昭

1. はじめに

板状コンクリート構造物の内部欠陥探査を目的とした衝撃弾性波法では、内部欠陥と測定表面間での波動の多重反射による特定周波数成分が生成されることを基本原理としている Impact Echo 法¹⁾及び内部欠陥の存在によってみかけの弾性波速度が低下するとする iTECS 法²⁾などの手法がある。これらの方法は、検査対象とするコンクリート構造物が板状であることを前提としており、PC 橋梁桁の下フランジ部分のシーす未充填度合いの検知、などには応用することが難しい。

本論では、打撃によって弾性波をコンクリート構造物に入力し、その反射波の到達時刻から、内部欠陥の位置を推定する方法³⁾について、2次元固体波動方程式の数値解⁴⁾を利用し、理論的な検討を行った結果について報告する。

2. 反射波の検出

2.1 数値計算による検証

2次元固体波動方程式の数値解を用いて、内部欠陥がある場合とない場合の応答波形について検討した。図

1に数値計算のモデルを示す。内部欠陥は、矩形断面であり、寸法は、16mm×16mmである。計算に使用した物性パラメータは、縦弾性波速度 4,000m/s、横弾性波速度 2,320m/sである。入力信号は、鋼球などによる打撃を模し、継続時間 50 μ sの半波正弦波状のパルスとした。信号入力点は、内部欠陥の中央直上、出力信号は、その右側 20mm、40mmの位置とした。図-2は、内部欠陥の有無による計算波形を示しており、両者の波形では、60 μ s付近に違いが生じている。この時刻は、打撃力のピークから約 30 μ s経過しており、波動の伝搬時間を考慮すると、設定した内部欠陥からの反射波の到達時間であると考えられる。また、約 120 μ sでは、両者の波形が再び一致するが、この時刻は、波動が底面で反射して測定面に到達する時刻である。

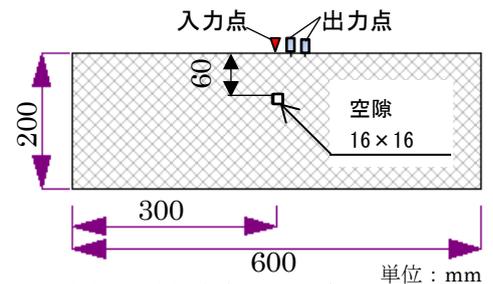


図-1 数値計算のモデル

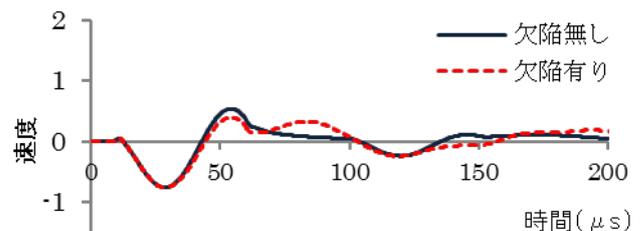


図-2 内部欠陥の有無による応答波形の比較

図-2のように、健全部との相対比較が可能であれば、波形の差異から内部欠陥位置を推定することは可能であるが、実際的には、その可能性は低い。内部欠陥の有無は調査結果からしか判定できないからである。反射波の到達の検知を目的として、出力波形をヒルベルト変換し、その位相の変化に着目した。図-3は、ヒルベルト変換によって得られた位相を欠陥の有無で比較したものである。なお、ヒルベルト変換は、得られた波形が振幅

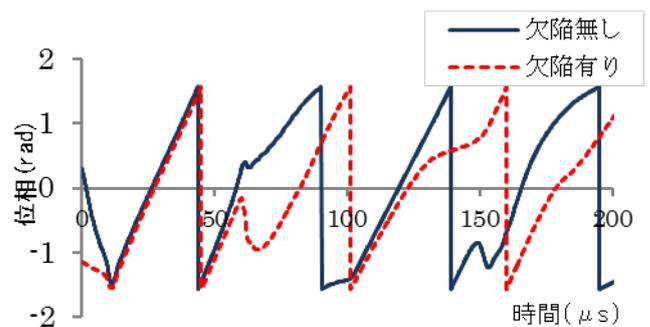


図-3 ヒルベルト変換による位相の比較

キーワード 非破壊試験, 衝撃弾性波法, 数値計算, ヒルベルト変換

連絡先 〒300-2635 茨城県つくば市東光台1-6-6 (株) 東洋計測リサーチ TEL029-848-0065

値の変化によるものか位相の変化によるものかを分離解析する変換方法である。図-3 に示されるように、欠陥の有無によって位相に差異があり、内部欠陥からの反射波が最大振幅になっていると想定される $60\mu\text{s}$ 付近では、大きな位相変化が見られる。打撃を原因として発生した波動では、構造物表面を表面波として伝搬し、この間位相の変化は時間に対して一様である。しかし、構造物内部からの反射波や外乱ノイズなどが重畳し、両者の波動に位相の差があれば、これを原因として測定波形に位相の乱れが発生すると考えられる。

2.2 測定距離による位相の変化

図-4, 5 は、出力信号の測定位置を 20, 40mm とした場合の計算波形の位相の時間変化である。図-4 は、欠陥がない場合、図-5 は内部欠陥がある場合である。両者の図の比較から明らかとなり、少なくとも時刻 $50\mu\text{s}$ 前後までは、内部欠陥の有無に拘わらず、二つの点間の位相差はほぼ等しい。この時間内では、表面を伝搬する波動のみが観測されるためである。これに対し、内部欠陥がある場合では $60\mu\text{s}$ 以降で、位相差が逆転する現象が現れている。すなわち、内部欠陥がない場合では、約 $95\mu\text{s}$ までは、測定距離 20mm の位相が先行しているのに対し、内部欠陥がある場合には、 $60\mu\text{s}$ で、測定距離 40mm の方が先行しているように見える。表面を伝搬する縦弾性波あるいは表面波のみが観測される条件では、打撃点に近い方の位相が先行することは明かであるが、図-5 の事例は、これに反する。つまり、この間に表面波のみではない別の波動が到達したと考えられる。すなわち、内部欠陥からの反射波の到達が疑われる。図-5 では、測定位置 20mm で約 $60\mu\text{s}$ 、40mm では約 $70\mu\text{s}$ に位相の乱れが見られる。ここで、二つの測定点の距離差 20mm を表面波が伝搬する時間はおおよそ $10\mu\text{s}$ であることを考慮すると、表面波と反射波の位相が反転する条件になっている可能性が考えられる。

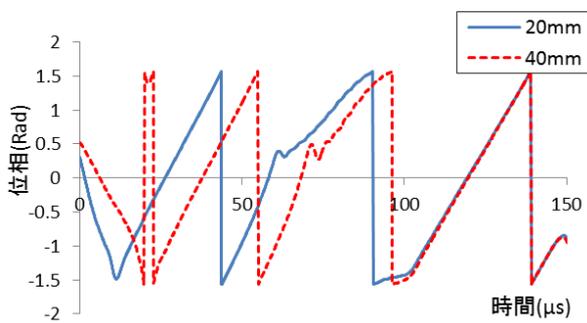


図-4 位相の比較(欠陥無し)

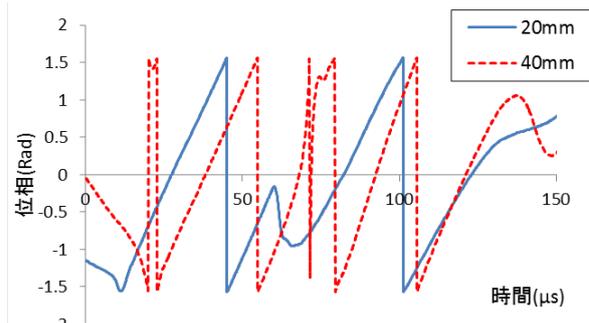


図-5 位相の比較(欠陥有り)

3. まとめ

本論では、構造物内部の欠陥(空隙)を検出する方法として、内部欠陥からの反射波の到達時刻を検知するために、2次元固体波動方程式の数値計算による波形生成を用いて、理論的側面から検討を行った。入力する打撃力の継続時間が短い場合では、超音波法のように、測定した波形の中に含まれる反射波から内部欠陥の可能性を推察することができるが、衝撃弾性波法では、表面を伝搬する表面波と内部欠陥からの反射波が重畳する可能性が高く、振幅情報のみからでは、表面波と反射波を直感的に分けることは出来ない。しかし、ヒルベルト変換を用いて位相の変化に着目すると、表面波と反射波の位相が反転して重畳した場合に、測定波形の位相の乱れが検知可能な大きさになることが明らかになり、位相に着目した内部欠陥探査手法の可能性が示された。

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, 極檀邦夫ら: 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) 山下健太郎ら: 周波数制御した信号入力方法の部材厚さ測定法の適用性の検討, 日本非破壊検査協会平成 27 年度秋季大会講演概要集
- 4) 山下健太郎, 境友昭: 2次元波動方程式の差分解法及びびびり割れ深さ測定方法の検討, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次大会 2016 投稿中