

受信波の位相変化量に基づいた内部欠陥サイズ推定方法の検討

(株)大進コンサルタント 正会員 炭谷 浩一

(株)東洋計測リサーチ 正会員 山下健太郎

1. はじめに

衝撃弾性波法は、超音波法とは異なり比較的長周期の弾性波を使用するため、反射波の到達時刻から、弾性波を反射させる内部欠陥の位置を直接的に推定することは出来ない。このため、衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の内部欠陥探査では、板状の構造物を対象とし、測定点と反射面間での波動の多重反射による定在波の周波数を求める方法が用いられてきた。しかしながら、この従来の方法では、PC 桁の下フランジ部のように板状ではない構造物の内部欠陥を探査することは出来なかった。そこで、筆者らは、反射波の到達を波動の位相変化によって検出する方法を検討してきた¹⁾。本論では、位相の変化量が反射波の振幅に依存する傾向を示すことに着目し、波動の反射率と位相変化との関係について考察した結果を報告する。

2. 表面波と反射波の重畳

測定対象となる構造物の表面に周波数がほぼ一定となるトーンバースト信号²⁾を入力し、入力点の近傍で、振動波形を測定する。測定される振動は表面波として伝搬してきた波と、内部欠陥や対向面などから反射した縦弾性波が重畳した波であると仮定する。簡単のため、測定点に到達した表面波を、十分な継続時間を持つトーンバースト信号とし $S(t) = A \sin \omega t$ 、反射波を $R(t) = B \sin(\omega t + \theta)$ とする。ここで、位相 θ は、表面波と反射波の到達時間差に由来する。この時、合成された波動は、

$$S(t) + R(t) = \sqrt{(A + B \cos \theta)^2 + (B \sin \theta)^2} \sin(\omega t + \varphi), \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{B \sin \theta}{A + B \cos \theta}$$

となる。すなわち、 θ が $N\pi$ 以外の場合には、反射波の重畳によって、位相の変化が生じる。位相差が最も大きくなるのは、 θ が $\pi/2 + N\pi$ のときであり、反射波の振幅が表面波の $1/10$ であれば、位相変化は約 0.1 rad である。

3. 数値計算による検討

図 1 に、数値計算に使用した入力信号とその位相差を示す。信号の周波数は 10 kHz であり、 $200 \mu \text{ s}$ から振幅 1 となる。位相差は、数値計算での差分時間(ここでは、 $1 \mu \text{ s}$)の間での位相の変化であり、計算上 $\pi/50 \text{ rad}$ となる。なお、位相は、ヒルベルト変換によって算出している。図

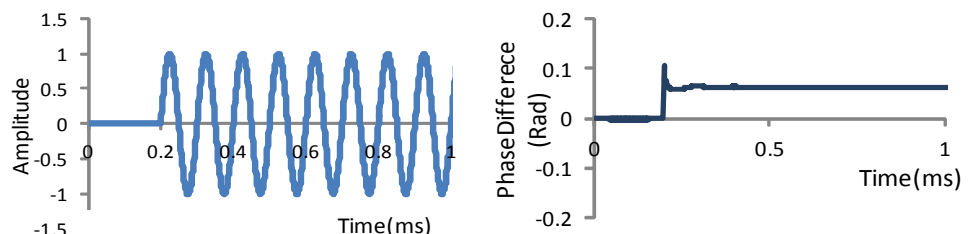


図 1 入力信号 (左) その位相差 (時間差, 右)

2 は、位相の異なる反射波とみなした波動が重畳した場合の波形と単位時間の位相差を示したものである。時刻、 $388 \mu \text{ s}$ で位相差に大きな変化が見られるが、これは、反射波が到達した時刻である。なお、図 2 から、同一周波数の波動

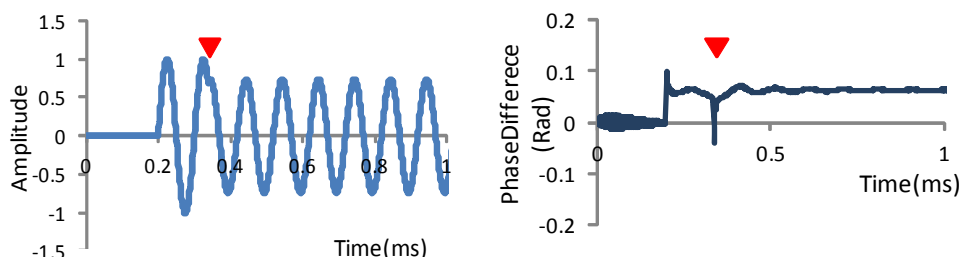


図 2 反射波が重畳した信号 (左) その位相差 (時間差, 右)

キーワード 衝撃弾性波, 非破壊試験, トーンバースト信号, 位相差, ヒルベルト変換

連絡先 〒861-2102 熊本県熊本市東区沼山津 4 丁目 2-22 (株)大進コンサルタント TEL096-365-0112

が重畳した場合、波形が重なった瞬間に位相差が大きく変化するものの、その後の位相差には変化が無いことが分かる。すなわち、この位相差変化時刻を検出することによって、反射波のような異なった成分の波動の重畳時刻を決定できる可能性が示される。

図3は、反射面の深さと位相差が変化する時間(遅れ時間)の関係を分析したものである。図に示されるとおり、両者には正比例となる関係があり、位相差が変化する時刻が、反射波の到達時刻を示していることがわかる。

図4は、反射率(表面波の振幅に対する遅延混入波の振幅比)と、位相差の相対比の関係を示したものである。位相差の相対比は、差分時間で当然生じる位相差(この計算事例では 0.0628rad)に対する比率であり、計算あるいは測定時の離散化時間を規準化する操作である。図中、2本の曲線を描いているが、これは位相差が正となる場合(○実線)と負となる場合(□破線)を意味する。反射率と規準化された位相差比の間には、線形比例関係が推定され、位相差比は、反射率の約0.7倍となっている。すなわち、分析された位相差比の約1.43倍を、表面波と反射波の振幅の比率と考えると、内部欠陥などによる波動の反射率の推定が可能となる。ただし、この場合、弾性体内を伝搬する縦弾性波の振幅と表面波の振幅の比率について、あらかじめ情報を得ておく必要がある。

図5は、数値計算で得た、位相差が変化する時刻と、位相差の関係を示すものである。位相差は、周期性を持ち、その周期は、入力信号の周波数と等しい。数値計算に使用したデータが有限個であるため、波形に乱れが生じているが、波形は矩形波となり、正負側での絶対値は、ほぼ等しいと言えよう。すなわち、位相差が分析された場合、その符号は内部欠陥探査に対して特段の影響を及ぼすものではないと考えることができる。

4. まとめ

測定波形の位相変化を分析し、位相変化量を規準化することによって、反射波の相対振幅を推定する方法について、数値計算を用いて検討した。この測定原理では、構造物の表面を伝搬する表面波と構造物内部に伝搬し、内部欠陥から反射して測定点に達する反射波が、同一周波数で少なくとも反射波が到達する間での時間は継続することが前提となる。すなわち、これまでの衝撃弾性波法のようにインパクト等で打撃してインパルス信号を入力する方法ではなく、トーンバースト信号を弾性波として入力する必要がある。このような信号が入力出来ることを前提として、測定波形に現れる位相差の変化時刻を反射波の到達時刻とし、またその位相変化の大きさが、表面波と反射波の振幅比に依存することを明らかにした。

参考文献

- 1) 山下健太郎他：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，土木学会第71回年次学術講演会 V-457
- 2) 炭谷浩一他：衝撃弾性波法における入力信号周波数制御方法，日本非破壊検査協会平成27年度秋季大会講演概要集

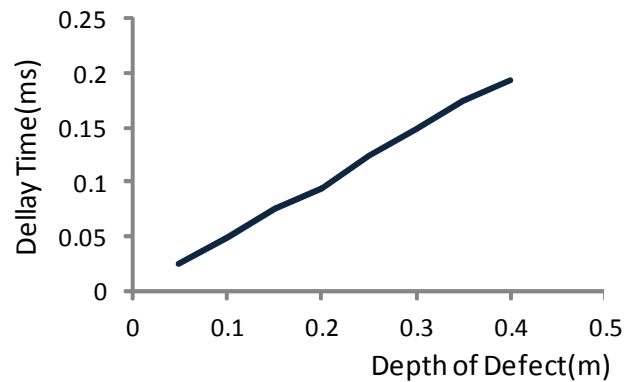


図3 欠陥深さと位相差変化の遅れ時間

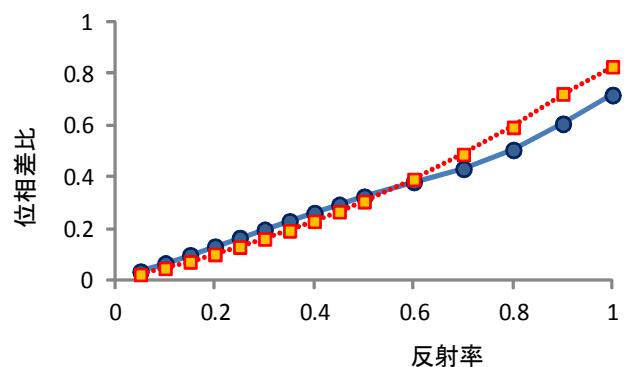


図4 反射率と位相差の相対比

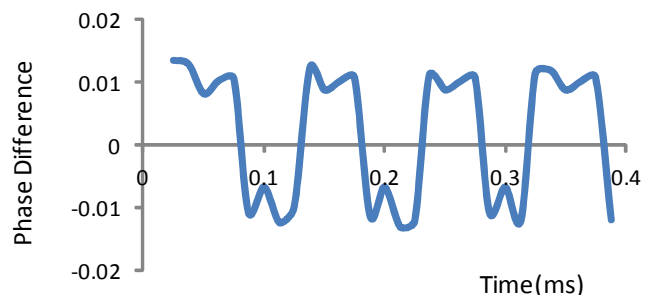


図5 位相変化時刻と位相差の関係