

表面波と反射波の干渉を利用したPCグラウトの充填不足非破壊検査手法

(株)東洋計測リサーチ ○山下 健太郎
オリエンタル白石(株) 正会員 工博 手塚 正道

Abstract : Detection of the internal defects in the PC bridge beam by previous impact-echo method is based on the phenomena of the frequency changes in the standing wave frequency in the plate in the thickness direction. This method is hard to apply to the integrity test of non plate like cross section part like an under flange of the PC bridge beam. Therefore the method to define the time when the reflected wave generated by the internal defect even for the impact-echo method is needed. We tried to develop the new method to define the travel time of the wave which is reflected by the internal defects by means of phase fluctuation of the wave measured on the structure surface. From the results of numerical analysis and field tests on an actual size specimen, applicability of the our method were shown.

Key words : Impact Echo Method, PC bridge, Void detect, Phase fluctuation

1. はじめに

インパクトエコー法を主体とする衝撃弾性波法¹⁾は、主として板状の構造物を対象とし、縦弾性波が板の厚さ方向に多重反射して生成される定在波の周波数から、板の厚さを測定することを基本原理としている。構造物の内部に空隙などの欠陥があると、欠陥と測定表面の距離に応じた定在波が発生するとする考え方²⁾、および欠陥の存在によって定在波の周波数が変化することを利用した内部欠陥探察方法³⁾が提案されている。これらの手法では、例えばPC橋梁桁の下フランジ部のように断面形状が板状でない部位には、その基本原理を適用出来ない、という制限があった。一方、超音波法では、原則として内部欠陥で反射して測定面に到達する波動の到来時刻を入力信号と分離して計測出来るため、板状でない任意の断面形状での内部欠陥探査に適用できる、という長所がある。しかしながら、使用する弾性波の周波数が高いため、複合材料であるコンクリートでは、波動が材料境界で散乱することなどから、コンクリート構造物への適用には問題点が残されている。筆者らは、衝撃弾性波による任意の断面形状に対する内部欠陥探査を目的とし、打撃によって発生した表面波と内部欠陥からの反射波が重畳することによる位相の変化に着目した探査手法の研究を行ってきた^{4),5)}。本論文では、その基本原理、数値計算による適用性の検討、および、PC桁供試体を用いた検証実験結果について紹介する。

2. 測定原理

2.1 位相差を保つ波動の重畳

弾性固体とみなし得るコンクリート構造物の表面の1点を特定周波数が一定時間連続するトーンバースト状の力信号で加振すると、弾性波は構造物全体に伝搬し、表面には表面波(レーリー波)が発生する。また、構造物の内部に空隙などの内部欠陥があると、弾性波はそこで反射して、コンクリート表面に到達することとなる。信号入力点と測定点および、内部欠陥の幾何学的関係によって、表面波が先に到来し、これに反射波が重畳する場合と、先に反射波が到来し、次いで表面波が重畳する場合がある。個々の波動の位相の時間変化率は一定であるが、二つの波動が、位相差を保って重畳した場合、測定波形の位相の時間変化率に変化が生じる。測定点に到達した表面波を簡単のため $X(t) = A \sin \omega t$ 、また、内部欠陥で反射し測定点に到達した波動を $Y(t) = B \sin(\omega t + \theta)$ とすると、合成された波動は、

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

である。式(1)から二つの波動の位相差 θ が $N\pi$ でない場合には、合成波形に位相差 φ が生じることに

なる。位相差の時間変化は、波形が重畳した瞬間に生じ、その大きさは二つの波動の振幅比に依存する。この位相の時間変化を観測することができれば、表面波に重畳する別経路の波動、すなわち、内部欠陥などによる反射波の到来時刻を確定することが可能となる。また、位相の変化量が重畳する波動と表面波の振幅比に関係あるとすれば、位相差の時間変化量から波動の反射率、すなわち、内部欠陥の大きさに関する情報を得ることができる。

2.2 位相変化の検出

入力信号は、信号入力前での振幅が0の因果関数であるから、Hilbert変換を施すことによって、位相と振幅の時間変化を分離することができる。図-1は、数値計算に使用する10kHzのトーンバースト信号とHilbert変換によって算出した位相の時間変化率である。信号は、時刻200 μsから始まるが、分析された位相の時間変化率も同様に200 μsで変化し、その後は一定値となる。なお、位相の時間変化率は、1 μs間での位相の変化を示し、10kHzの信号ではπ/50Radとなる。位相の時間変化率にオーバーシュートやリップル(波打ち現象)が生じるのは、入力信号が立ち上がりにおいて不連続であること、また波形の継続時間が有限であるためである。

図-2は、同一周波数で位相の異なる反射波とみなした波動を重畳させた波形と、その位相の時間変化率を示している。波形のみで、反射波の重畳を弁別することは困難であるが、位相の時間変化率では、416 μsに位相の時間変化率に変動があり、異なった波動の重畳を検出することができる。また、図から、同一周波数の波形信号であれば、二つの波形が重なった時刻でのみ位相の時間変化率に変動が生じることがわかる。すなわち、位相の時間変化率の変動時刻を検出することによって、反射波の到来時刻を検知できる可能性が示された。

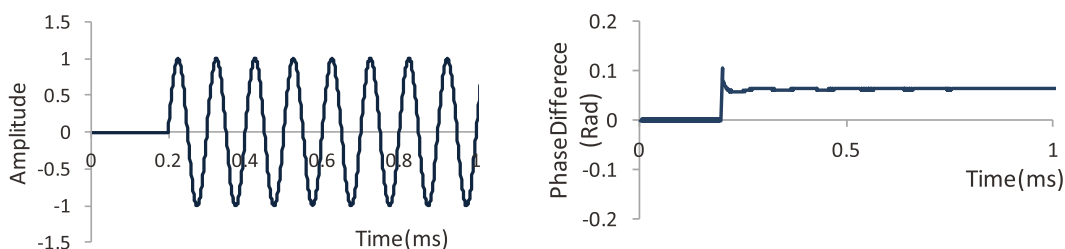


図-1 入力信号(左)と位相の時間変化率(右)

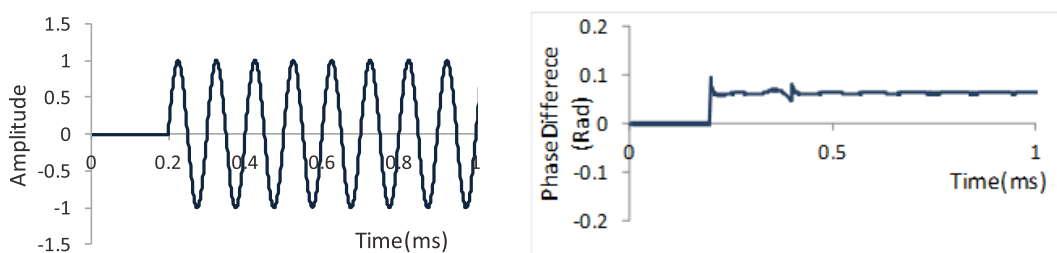


図-2 反射波が重畳した信号(左)とその位相の時間変化率(右)

2.3 位相差の変化による反射波の振幅推定

図-3は、表面波と遅れて重畳する波動の振幅比と位相の時間変化率の変動比の関係を求めたものである。両者は、単調増加関係となっているが線形比例関係ではない。べき乗近似曲線を適用すると、位相の時間変化率の変動比は振幅比の約1.2乗と計算なるが、理論的には式(1)の関係である。

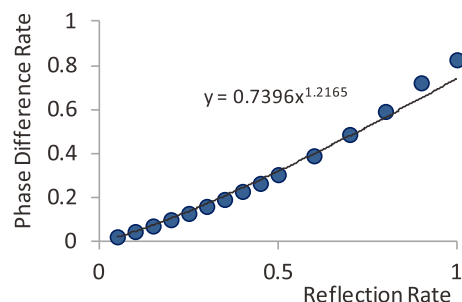


図-3 反射波の振幅比と位相の変化率変動

3. 測定装置・信号入力方法

3.1 プランジャーによる発生周波数の制御

一般的に衝撃弾性波法では、インパクトと呼ばれる「鋼球」などでコンクリート表面を直接打撃し、パルス状の弾性波を入力する。打撃によって発生する表面波では、打撃体の質量とコンクリート表面の剛性、打撃の強さに応じて、一定の周波数とはならないが、減衰する正弦波状の波形となる。これに対し、縦弾性波として伝搬し、内部欠陥で反射する波動は、打撃力波形と相似であり、表面波と内部欠陥からの反射波の波形は同じにはならない。両者の波形が異なると、波形の重畳による位相の時間変化率の分析が困難となることから、打撃によってトーンバースト状の信号を入力する方法について検討した。この方法として、鋼球による直接打撃ではなく、鋼棒(プランジャー)を仲介した間接打撃法⁹⁾を用いた。図-4は、先端部をコンクリート表面に押し付けた長さ125mmの鋼棒の頂部を直径10mmの鋼球で打撃し、打撃点から25mm離れたコンクリート表面で測定した振動加速度波形である。長さ125mm鋼棒の長さ方向の縦振動共振周波数は20.4kHzであり、図-4に示されるようにこの周波数を持つ擬似的トーンバースト信号が観測されている。なお、入力周波数は、使用する加速度計の測定可能な最大周波数を考慮して決定した。

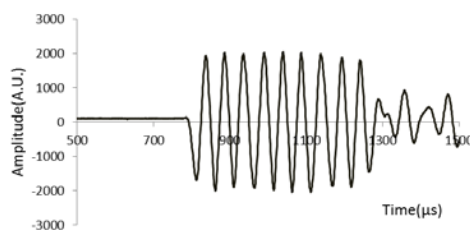


図-4 プランジャーを利用した打撃入力

3.2 測定装置

測定装置は、インパクト(衝撃型加速度計、感度0.5mV/G、周波数範囲5~35kHz)と7個の加速度計(感度10mV/G、周波数範囲5~25kHz)を装備し、インパクト(プランジャー長125mm、打撃用鋼球直径10mm、周波数20.4kHz)によるトーンバースト状信号に対する応答を、信号入力点から25mm等間隔の7点で同時測定した。AD変換は速度1μs、分解能12bit、測定データ長は各チャンネル4096個である。

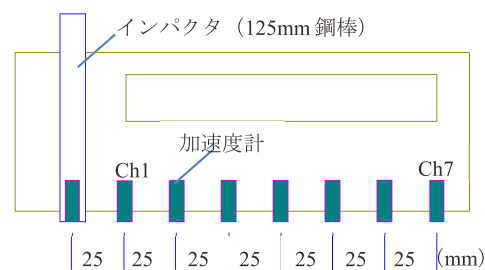


図-5 測定装置模式図

4. 実験

4.1 供試体

図-6に試験に使用した模型PC桁供試体の断面および、試験区間のシース(鋼製、呼び径45mm、9本)の配置を示す。試験は、下フランジ部に存在する未充填のシースを検知する目的で行った。なお、供試体は全長7.5mであり、1.5mごとにグラウトの充填状況が異なる5区間で構成されたものである。本論文では、1本のみ未充填シースを有する、区間1を対象とした試験結果について示す。

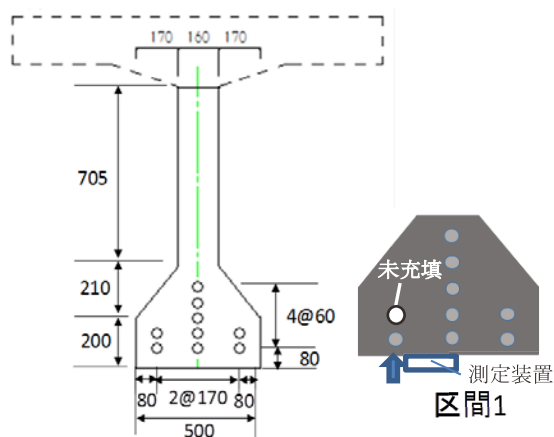


図-6 供試体の断面形状

4.2 測定方法

測定は、図-6に示すように下フランジ部の下側で行った。信号入力点は、未充填シースの直下であり、測定点は信号入力点から25mm間隔で7点、横断方向に配置している。測定装置は人力で押付けて密着した。

4.3 測定結果

測定した応答波形のパワースペクトルを図-7に示す。図は、全ての測定点のパワースペクトルを重ねたものであるが、若干の揺らぎはあるものの、20kHz付近にパワーが集中しており、また各測定点での周波数がほぼ等しいことがわかる。この周波数は、トーンバーストとして入力した信号の周波数である。また、図-8は、位相の時間変化率の分析結果の事例である。図-8から、測定点での波形の立上り時刻(ノイズと信号の切り替わり時刻)および、系列の異なる波動の重畳による位相の時間変化率の

変化時刻を知ることができる(図中矢印部)。表-1は、測定点ごとに時刻の読取り値(各点での観測周波数の差異を考慮して、10%程度の閾値とした)をまとめたものである。測定距離と波形の立上り時刻(到達時刻)の関係から、表面で観測される波動のみかけの速度および、信号の発生した時刻(入力時刻)を推定することができる。本測定では、みかけの波動伝搬速度は3,073m/s、信号発生時刻は、759 μ sと推定される。これを基に、位相差の変化時刻と桁のウェブ部で計測した、多重反射の一次共振周波数から計算した縦弾性波速度4,250m/sを用いて、幾何学的に内部欠陥の深さ(この測定では信号入力点直下)を推定した結果も表-1に並記している。実際の測定対象シースの純かぶり深さ、120mmに対し、内部欠陥深さ推定値の平均は、131mmとなった。

表-1 位相時間変化率から推定した各時刻と内部欠陥深さの推定値

測定チャンネル	2ch	3ch	4ch	5ch	6ch
信号源からの距離(mm)	50	75	100	125	150
波形の立上り(μ s)	775	786	791	798	809
位相差の変化時刻(μ s)	813	925	823	837	849
内部欠陥の深さ(mm)	109	126	118	142	162

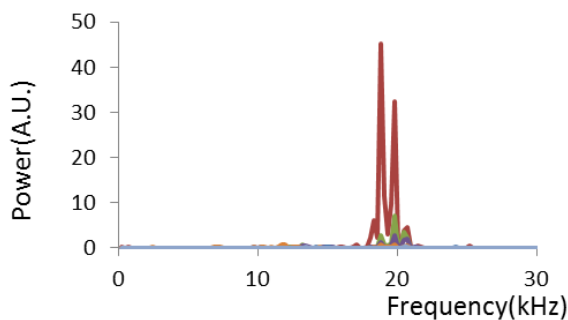


図-7 測定波形のパワースペクトル

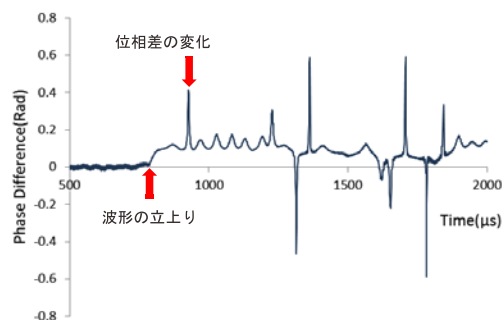


図-8 位相の時間変化率

5. おわりに

超音波と比較して音波領域の比較的低い周波数帯域を使用する衝撃弾性波は、コンクリート構造物の非破壊検査に適した周波数信号が利用できるという利点を持つが、使用する波動の波長が長いため、入力波と反射波を時間領域で区別出来ない、という難点があった。本論文で紹介した方法は、波動の重畳を位相変動によって捉える手法である。数値計算による理論的検討、また実際的な模型供試体を使用した実験の結果から、PC橋梁シースの未充填検知に適用できることが示された。ただし、この方法では、時間領域の信号を使用するため、信号の立上り時刻および、位相の時間変化率の変動時刻を客観的に決定する手法の確立、また表面波と内部欠陥での反射波のどちらが先に測定点に到達するかの判定など、現時点で解決すべき課題は多い状況である。

参考文献

- 1) NDIS2426-2 コンクリートの非破壊試験-弾性波法-第2部：衝撃弾性波法 (一社)日本非破壊検査協会規格 2014
- 2) Mary J. Sansalone William B. Streett: IMPACT-ECHO Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry 1997
- 3) 岩野聡史ら：衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥探査 コンクリート工学年次論文集vol. 24, No1, PP1521-1526 2002
- 4) 山下健太郎ら：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回年次学術講演会講演概要集 2016
- 5) 炭谷浩一ら：周波数制御した弾性波によるコンクリート内部欠陥探査-供試体実験-, 土木学会第71回年次学術講演会講演概要集 2016
- 6) 炭谷浩一ら：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 2015