

# コンクリート部材を打撃して得られた振動波形の周波数解析方法に関する検討

岩野 聡史<sup>1</sup>・森濱 和正<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 リック株式会社 技術研究所 (〒143-0015 東京都大田区大森西1-19-1)

E-mail: siwano@ri-k.co.jp

<sup>2</sup>正会員 独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

E-mail: kmoriha@pwri.go.jp

衝撃弾性波法の多重反射法での周波数解析方法について、一般に利用されているFFTの誤差要因や適用限界について検討し、これらを解消する方法として提案されている相関関数を利用した周波数解析方法について、この方法が成立する基本的な測定原理や有効性を実験により検証した。その結果、測定振動のFFTによる周波数解析は、波形の減衰が誤差要因となり、この影響を除去することが重要であることを明らかにした。これに対し、測定振動の第一波から設定される初期振動と測定振動との相互相関関数は、縦弾性波の往復時間と一致する周期性を示し、さらに、波形の減衰を反映しないことが確認された。これから、多重反射法では相互相関関数を求め、この相互相関関数に対してFFTを実施することが誤差要因を解消する有効な解析方法であることが示された。

**Key Words :** *non destructive test for concrete structures, impact elastic wave method, frequency analysis method, Fourier transform, cross-correlation function*

## 1. はじめに

コンクリート構造物の予防保全型の維持管理が必要とされている今日状況において、コンクリート構造物を壊さずに、コンクリート内部の状況を把握する非破壊試験技術は、さらなる向上が期待されている技術であると考えられる。

コンクリート構造物の部材厚さの推定、欠陥の検出などを行う非破壊試験方法の一つに衝撃弾性波法がある。衝撃弾性波法によってそれらを測定するには、コンクリート内部を多重反射する縦弾性波の往復時間を周波数解析によって求める方法（以下、多重反射法という）がある<sup>1)</sup>。多重反射法で求められる縦弾性波の往復時間は、コンクリートの弾性率の相違やコンクリート内部での縦弾性波の反射面の有無、つまりコンクリート内部での空洞等の欠陥の有無によって変化することから、コンクリートの非破壊試験において有効な情報となる。これから、この多重反射法を用いたコンクリート内部の欠陥探査方法などが検討されている<sup>2)</sup>。

一般に衝撃弾性波法での多重反射法で利用される周波数解析方法は、高速フーリエ変換による周波数解析（以下、FFTという）であるといえるが<sup>3)</sup>、この方法では、

部材厚さの厚いコンクリートでの適用に限界があるとして、筆者らは測定される振動（以下、測定振動という）の相関関数を利用した解析方法を提案している<sup>4)5)</sup>。この解析方法は、コンクリート表面から入力した縦弾性波は背面で反射して表面に到達するが、到達時のコンクリート表面での測定振動は、縦弾性波の入力時の測定振動と比較して伝搬過程での減衰により振幅は小さくなるものの、周波数の等しい同様の形状の振動であるという前提に基づいた解析方法である。これから、測定振動の第一波から縦弾性波の入力時の振動である初期振動を設定し、この初期振動と測定振動との相互相関関数を求めれば、この相互相関関数において、縦弾性波の往復時間と一致する周期性が確認でき、多重反射法での周波数解析方法に相互相関関数が利用できるとされている。

特に、衝撃弾性波法と同様に縦弾性波の往復時間を測定し、コンクリート内部の欠陥探査などを行う非破壊試験方法に超音波法があるが<sup>6)</sup>、超音波法と比較した場合の衝撃弾性波法の最大の長所は、使用する弾性波の波長が長いことから部材厚さの厚いコンクリートにも適用できることであり、衝撃弾性波法による多重反射法では、部材厚さの厚いコンクリートにも適用できる測定、解析方法を採用することが、長所を活かす意味では、重要に

なると考えられる。

しかし、既往の研究<sup>4)5)</sup>では、背面で反射した縦弾性波が表面に到達した時の測定振動は、入力時の測定振動と同じ周波数の振動であるという、提案されている相関関数を利用した周波数解析方法での前提に対する検証が不十分であり、基本的な原理が確認されていないという課題があった。また、FFTとの比較検討も不十分であり、提案されている相関関数を利用した解析方法を利用することにより、適用できる部材厚さの範囲が具体的にどの程度改善されるのかが不明確であった。これらから、本法には解析方法として、広く利用されていないという課題があると考えられる。そこで、本研究では厚さ110mm～600mmの供試体と厚さ1200mm～2400mmの実構造物のコンクリートを測定対象として、衝撃弾性波法による多重反射法での周波数解析方法としてFFTを採用し、誤差要因や適用限界などについて検討した。さらに、この誤差要因や適用限界を解消する周波数解析方法として、提案されている相関関数を利用した周波数解析方法について、この方法が成立する基本的な測定原理を実験により検証し、また、測定振動を直接FFTによって周波数解析を行なった結果と比較して、適用できる部材厚さの変化等の有効性を確認したのでその結果について報告する。

## 2. 振動波形のFFTによる周波数解析法における誤差要因と適用限界の検証実験

### (1) 実験概要

多重反射法による測定状況の模式図を図-1に示す。コンクリート表面を鋼球で打撃し、近傍の受信点に加速度計を設置して、発生する振動を測定する。この時、コンクリート内部にはコンクリート表面と背面で反射を繰り返す縦弾性波が発生するが、多重反射法では受信した測定振動に対して周波数解析を行い、求めた周波数スペクトルから縦弾性波の往復時間の逆数となる周波数を決定する。

本章に示す実験では、周波数解析方法としてFFTを採用し、周波数解析において卓越する周波数帯域が入力波長によってどの様な変化をして、解析結果にどの様な影響を及ぼすのかを確認することを目的として、入力波長を変化させた測定を行った。また、周波数解析方法としてFFTを採用する場合に適用できる厚さの範囲を確認することを目的として、測定対象コンクリートの厚さを変化させた測定を行った。

測定したコンクリートの概要を表-1に示す。表-1での縦弾性波速度とは、これらのコンクリートで図-2に示す伝搬時間差法により、事前に測定した結果である。また、表-1に示す全てのコンクリートは、幅、長さが厚さの6

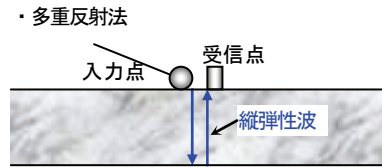


図-1 多重反射法による測定状況

表-1 測定対象コンクリート

設計厚さ (mm)	縦弾性波速度 (m/s)	セメント種類 (記号)	呼び強度	備考
110	3650	H	24	実験用供試体
200	4000	H	24	実験用供試体
300	4168	N	45	実験用供試体
400	4000	H	24	実験用供試体
600	3406	N	18	実験用供試体
1200	4033	BB	24	実構造物
1600	4060	BB	24	実構造物
1900	4108	BB	24	実構造物
2400	3994	詳細不明		実構造物

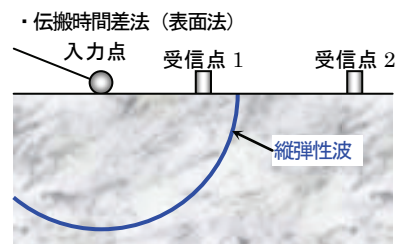


図-2 伝搬時間差法による測定状況

倍以上であり、文献3)に示される多重反射法の適用条件を満足する版形状である。

### (2) 入力波長による影響の確認実験

#### a) 実験内容

設計厚さ300mmのコンクリートと設計厚さ600mmのコンクリートを対象として、打撃する鋼球の直径を変化させて、弾性波の入力波長を変化させる測定を行った。鋼球直径によって弾性波の入力波長が変化する性質は、式(1)で示される、鋼球直径(半径)が変化すれば鋼球とコンクリートとの接触時間が変化する性質とこの接触時間は入力波形の周波数成分に影響をおよぼす性質によるもので、鋼球直径が小さくなれば接触時間が短く、入力波長が短くなる性質である<sup>7)</sup>。

$$T_C = 5.97[\rho_s(\delta_s + \delta_p)]^{2/5} \frac{R}{h^{0.1}} \quad (1)$$

ただし、 $\left( \delta_p = \frac{1-v_p^2}{\pi E_p}, \delta_s = \frac{1-v_s^2}{\pi E_s} \right)$

ここに、 $T_C$ : 鋼球とコンクリートとの接触時間、

$\rho_s$ : 鋼球密度,  $R$ : 鋼球半径,  $h$ : 落下高さ,  $\nu_p$ : コンクリートのポアソン比,  $\nu_s$ : 鋼球のポアソン比,  $E_p$ : コンクリートのヤング率,  $E_s$ : 鋼球のヤング率である.

この測定により, 入力波長の変化による影響の有無を確認した. 測定に使用した加速度計はPCB社製352C66型, サンプル間隔は2 $\mu$ s, サンプルデータ数は4096個, 弾性波を入力させた鋼球の直径は, 設計厚さ300mm

のコンクリートでは8mm, 10mm, 15mm, 20mm, 設計厚さ600mmのコンクリートでは10mm, 15mm, 20mm, 30mmである. 1回の測定での打撃回数は3回以上とし, 測定結果の再現性を確認して, 1回のデータを記録した.

**b) 実験結果**

設計厚さ300mmのコンクリートでの測定振動と周波数スペクトルを図-3に, 設計厚さ600mmのコンクリートで

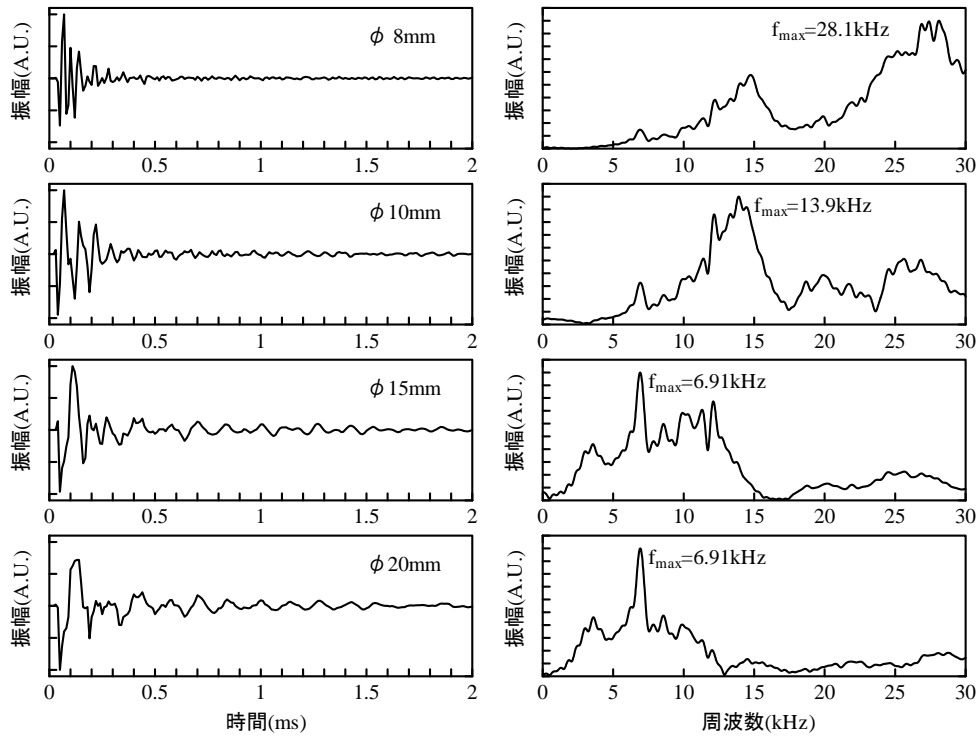


図-3 各入力波長での測定振動 (左図) と周波数スペクトル (右図) (設計厚さ300mm)

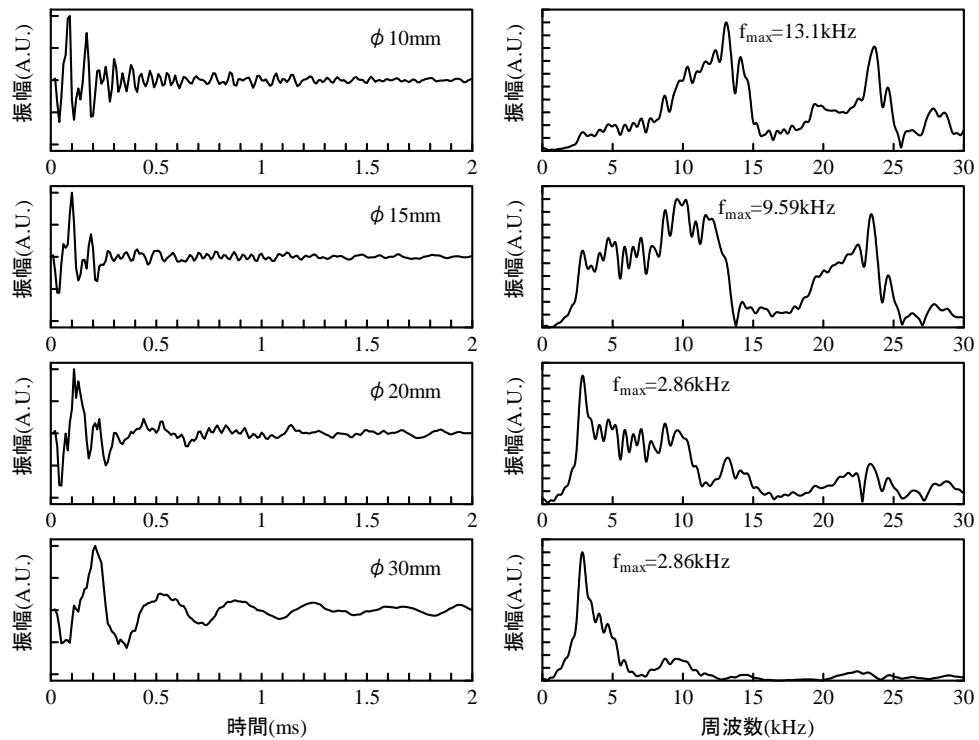


図-4 各入力波長での測定振動 (左図) と周波数スペクトル (右図) (設計厚さ600mm)

の測定振動と周波数スペクトルを図-4に示す。図-3、図-4の縦軸は振幅の最大値で標準化した任意の単位である。図-3、図-4より、鋼球の直径によって周波数スペクトルは変化し、鋼球の直径が小さく、入力波長が短くなるほど高域の周波数成分の振幅値が大きくなることを確認される。

縦弾性波の多重反射により生成される周波数 $f_0$ はコンクリートの厚さ $D_0$ と縦弾性波速度 $V_p$ から式(2)より算出でき、表-1に示した縦弾性波速度から算出すると設計厚さ300mmのコンクリートでは6.95kHz、設計厚さ600mmのコンクリートでは2.84kHzとなる。

$$f_0 = \frac{V_p}{2D_0} \quad (2)$$

式(2)より算出した周波数 $f_0$ と図-3、図-4に示した周波数スペクトルを比較すると、設計厚さ300mmのコンクリートでの鋼球直径8mmと10mm、設計厚さ600mmのコンクリートでの鋼球直径10mmと15mm、これらでは周波数 $f_0$ は卓越しているものの振幅値は微小であり、これらの周波数スペクトルから周波数 $f_0$ を客観的に判断することは出来ない結果であるといえる。

この原因を考えると、鋼球打撃によりコンクリート表面に設置した受信点での測定振動には、図-5に模式図を示す表面を伝搬するレイリー波や<sup>8)</sup>、縦弾性波の多重反射により生成される周波数 $f_0$ の整数倍の周波数を持つ振動などがあり、周波数 $f_0$ 以外にも様々な周波数成分の振動が測定されることとなる。これらに対して、入力波長は前述のとおり打撃する鋼球の直径によって変化することから、各鋼球での入力波長に対応した周波数成分の振動の振幅が大きくなり、入力波長によって周波数スペクトルが変化したものと考えられる。

以上の結果より、周波数解析方法としてFFTを採用した多重反射法により縦弾性波の往復時間の逆数となる周波数を求めるには、この周波数と、鋼球とコンクリートとの接触時間により変化する入力波形の周波数とを近似させることが測定に必要な条件になるといえる。

### (3) コンクリート厚さを変化させた測定実験

#### a) 実験内容

表-1に示した設計厚さ110mm~2400mmの全コンクリートを対象として、FFTによるコンクリートの厚さの適用限界を確認する実験を行った。測定に使用した鋼球の直径は設計厚さ110mmでは直径8mm、設計厚さ200mmでは直径15mm、設計厚さ300mmでは直径20mm、設計厚さ400mmと600mmでは直径30mm、設計厚さ1200mmと1600mmでは直径63mm、設計厚さ1900mmと2400mmでは直径76mmと、コンクリート厚さによって変化させた。これは、前節で示された、縦弾性波の多重反射により生成される周波数が測定できる入力波長を考慮したもので

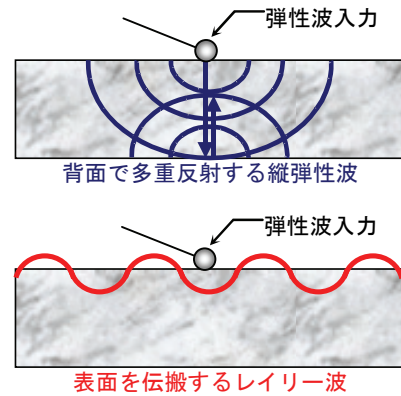


図-5 衝撃弾性波法により発生する振動の模式図

ある。加速度計はPCB社製352C66型、サンプリング間隔は設計厚さ110mm~600mmは2 $\mu$ s、設計厚さ1200mm~2400mmは10 $\mu$ s、サンプリングデータ数は4096個である。

#### b) 実験結果

設計厚さ110mm~600mmのコンクリートでの測定振動と周波数スペクトルを図-6に、設計厚さ1200mm~2400mmのコンクリートでの測定振動と周波数スペクトルを図-7に示す。図-6、図-7の縦軸は振幅の最大値で標準化した任意の単位である。図-6、図-7には周波数スペクトルにおいて振幅が最大となった周波数 $f_{max}$ と式(3)により算出したコンクリートの推定厚さ $D$ を示した。

$$D = \frac{V_p}{2f_{max}} \quad (3)$$

測定結果より、設計厚さ110mm~1600mmでは、式(3)によるコンクリートの推定厚さ $D$ と設計厚さは良く一致する結果となった。これから、これらのコンクリートでは、入力波長を考慮した測定振動のFFTにより周波数スペクトルを求めれば、振幅が最大となる周波数から縦弾性波の多重反射により生成される周波数を判断することが可能である。これに対して、設計厚さ1900mm、2400mmでは式(3)によるコンクリートの推定厚さ $D$ と設計厚さは大きく異なる結果となった。つまり、周波数スペクトルで振幅が最大となった周波数は、縦弾性波の多重反射により生成される周波数とは無関係の周波数であった。

設計厚さ1900mm、2400mmでの縦弾性波の多重反射により生成される周波数 $f_0$ をコンクリートの厚さ $D_0$ と表-1に示した縦弾性波速度 $V_p$ から式(2)により算出すると、設計厚さ1900mmのコンクリートでは1.08kHz、設計厚さ2400mmのコンクリートでは0.83kHzとなる。これに対し、設計厚さ1900mm、2400mmの周波数スペクトルは、周波数0kHz~4kHzの広い帯域でパルス状の形状となっており、これらの周波数 $f_0$ を明確に確認することはできない。

FFTによる周波数スペクトルがこの様に広い周波数帯域でパルス状の形状となるのは、波形の個数が少ない場

合での典型的な特徴であり、設計厚さ1900mm, 2400mmは、波形の個数が一個と同様の周波数スペクトルであったといえる。

つまり、コンクリート表面には、鋼球打撃による縦弾性波の入力時に鋼球とコンクリート表面との接触による振動が発生し、その後はコンクリート内部を多重反射す

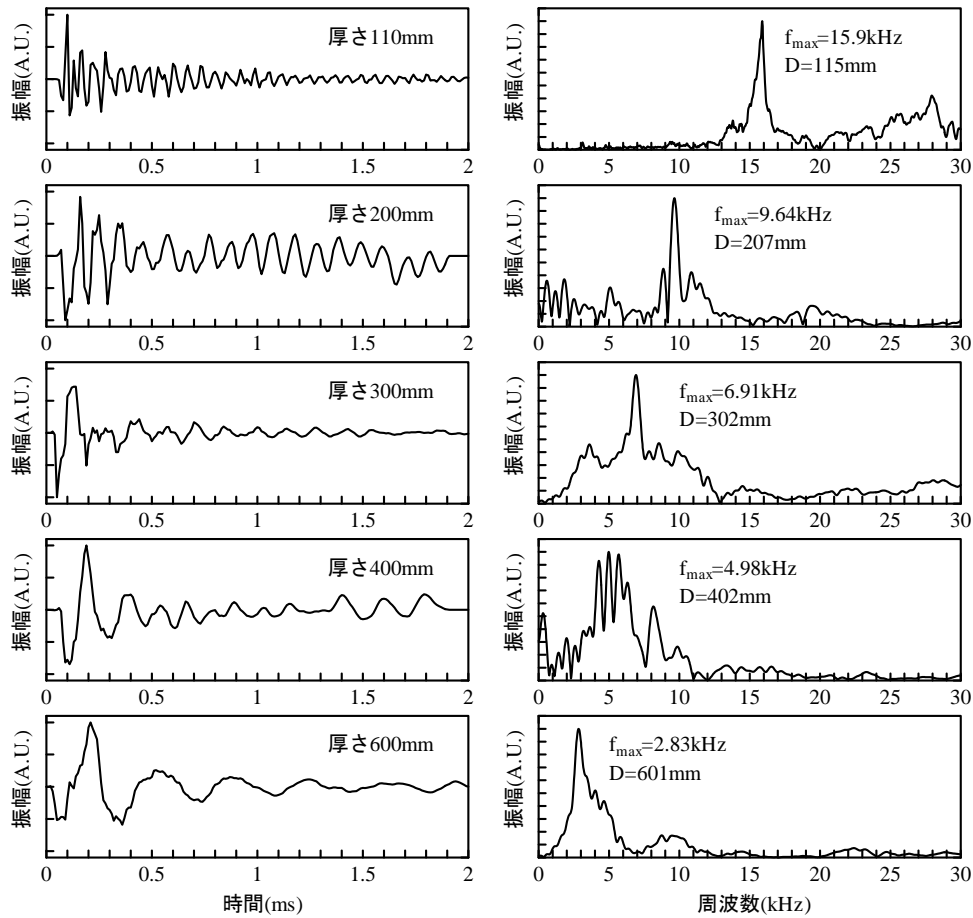


図-6 設計厚さ110mm～設計厚さ600mmのコンクリートでの測定振動（左図）と周波数スペクトル（右図）

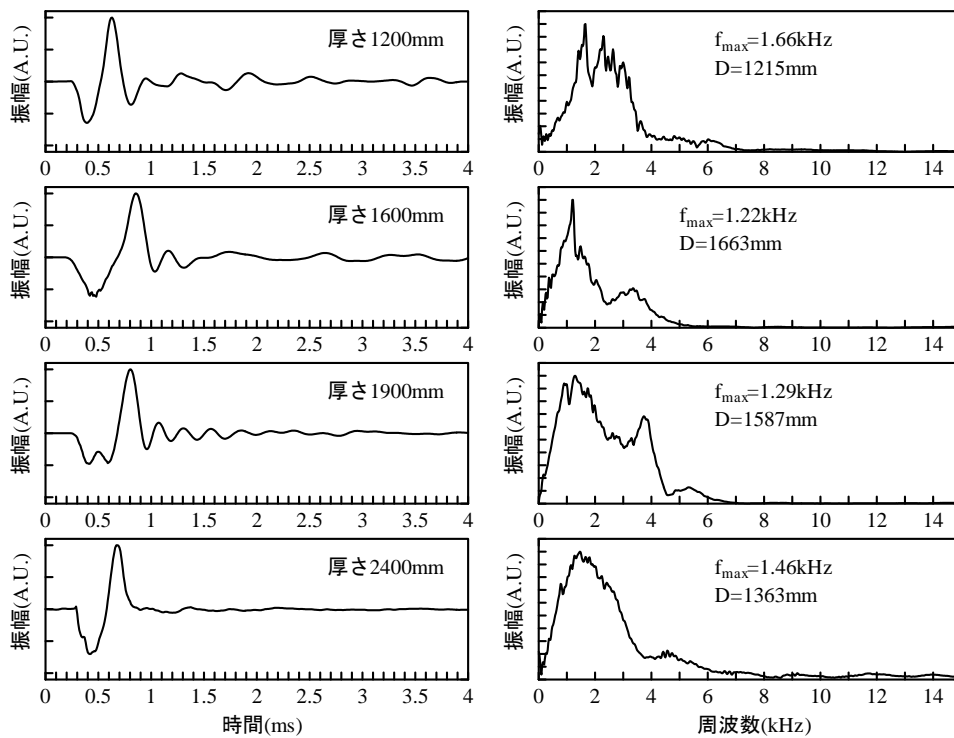


図-7 設計厚さ1200mm～設計厚さ2400mmのコンクリートでの測定振動（左図）と周波数スペクトル（右図）

る縦弾性波が存在するが、実際に受信された測定振動は、縦弾性波の多重反射による振動の減衰が著しく、縦弾性波の入力時の振動のみであったといえる。これから、縦弾性波の多重反射による振動はFFTによる周波数スペクトルに反映されなかったものと考えられる。

以上のとおり、FFTによる周波数解析方法では、部材厚さが2000mm程度以上と厚いコンクリートでは、多重反射する縦弾性波が減衰する影響により、縦弾性波の多重反射により生成される周波数を正確に測定できないものと考えられる。

#### (4) FFTによる周波数解析法における誤差要因と適用限界の検証実験結果のまとめ

多重反射法による周波数解析方法をFFTとする場合での誤差要因および適用限界を確認するため入力波長を変化させた測定、測定対象コンクリートの厚さを変化させた測定、これらを実施した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 周波数スペクトルは入力波長によって変化する。これは、鋼球打撃によるコンクリート表面での測定振動には、縦弾性波の多重反射による振動以外にも様々な振動があり、周波数解析結果では、入力波長に対応した周波数成分の振動の振幅が大きくなるためである。これから、周波数解析方法としてFFTを採用した多重反射法により縦弾性波の往復時間の逆数となる周波数を求めるには、この周波数と、鋼球とコンクリートとの接触時間により変化する入力波形の周波数とを近似させることが測定に必要な条件になるといえる。
- 2) 部材厚さが2000mm程度以上と厚いコンクリートではFFTによる周波数解析で縦弾性波の多重反射により生成される周波数を正確に測定することは困難である。これはコンクリート内部を多重反射する縦弾性波の減衰が著しいことにより、周波数解析結果は鋼球打撃による縦弾性波の入力時の振動にしか反映できないことによると考えられる。

以上の結果より、多重反射法による周波数解析方法としてFFTを適用するには、入力波長に留意すること、波形の減衰による影響を除去すること、これらが重要な課題になると考えられる。

### 3. 相関関数を利用した周波数解析方法の検証実験

#### (1) 実験概要

2章に示された、多重反射法による周波数解析方法としてFFTを適用する場合に課題となる波形の減衰による影響について、この影響を除去する方法として相関関数を利用する方法が提案されている<sup>4),5)</sup>。この方法が成立

する基本的な原理を確認するため、振動の入力面、背面に受信点を設置し、鋼球打撃によりどのような振動がコンクリートに発生するのかを確認した。

#### (2) 相関関数を利用した周波数解析方法について

この方法は、打撃点の近傍で受信した測定振動の第一波から縦弾性波の入力時の振動である初期振動を設定し、この初期振動と測定振動との相互相関関数を式(4)により求め、この相互相関関数に対するFFTから縦弾性波の往復時間の逆数となる周波数を求める解析方法である。この解析方法は、コンクリート表面から入力した縦弾性波は背面で反射して表面に到達するが、到達時のコンクリート表面での測定振動は、縦弾性波の入力時の測定振動と比較して伝搬過程での減衰により振幅は小さくなるものの、周波数の等しい同様の形状の振動であるということ的前提としている。つまり、相互相関関数では縦弾性波が到達する度に相関係数が高くなり、縦弾性波の往復時間と一致する周期性が確認できるということを測定原理としている。

なお、相互相関関数に対するFFTはクロススペクトルとして知られているが<sup>9)</sup>、本法では式(4)での分母の計算により、正規化した相互相関関数としている。これから、本法での相互相関関数に対するFFTは、クロススペクトルとは一致しない。

$$R(\tau) = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_1+T} \{y_1(t) - \overline{y_1(t)}\} \{y_2(t+\tau) - \overline{y_2(t+\tau)}\}}{\sqrt{\sum_{t=t_1}^{t_1+T} \{y_1(t) - \overline{y_1(t)}\}^2} \sqrt{\sum_{t=t_1}^{t_1+T} \{y_2(t+\tau) - \overline{y_2(t+\tau)}\}^2}} \quad (4)$$

ここで、 $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$  は測定振動、 $\overline{y(t)}$  は  $y(t)$  の  $t=t_1 \sim t_1+T$  での平均値、 $\tau$  は時間差、 $R(\tau)$  は時間差  $\tau$  での相互相関係数、 $t_1$  は  $y_1(t)$  での第一波の開始時間、 $T$  は  $y_1(t)$  での第一波の周期の1.5倍程度の時間とした。つまり、 $t=t_1 \sim t_1+T$  での  $y_1(t)$  は縦弾性波の入力時の振動である初期振動であり、式(4)により、初期振動と測定振動  $y_2(t)$  との相互相関関数が求められる。

$T$  の設定について、設定される  $T$  の長さによって相互相関関数の対象となる振動の長さが決定されることとなる。ここでは、縦弾性波の入力時の測定振動と同様の形状の振動が背面に到達しているのかを確認することを目的として、相互相関関数を求めることから、対象となる振動の長さ ( $T$  の長さ) は、 $y_1(t)$  での第一波の波長、周期と同程度に設定することが望ましい。ただし、 $T$  の長さを  $y_1(t)$  での第一波の波長1個分、1周期分のみとすると、 $y_1(t)$  での第一波と周波数の等しいノイズが、短時間でも測定された場合に相関係数が高くなってしまいう可能性があることから、 $T$  は  $y_1(t)$  での第一波の周期の1.5

倍程度の時間とした。なお、 $y_1(t)$ での第一波の周期は測定振動の振幅値が0となる時間間隔より判断した。

(3) 背面側の受信点で測定される振動の検証実験

a) 実験内容

測定点の設定状況を図-8に示す。受信点を弾性波を入力する面とその反対側の背面に設置した。測定したコンクリートは、表-1に示す設計厚さ300mmのコンクリートと設計厚さ600mmのコンクリートである。弾性波を入力させた鋼球の直径は、設計厚さ300mmのコンクリートでは8mm, 10mm, 15mm, 20mm, 設計厚さ600mmのコンクリートでは10mm, 15mm, 20mm, 30mmで、入力波長を変化させて測定し、それぞれの入力波長でどのような振動が入力面、背面に発生するのかを確認した。測定に使用した加速度計はPCB社製352C66型、サンプリング間隔は2 $\mu$ s、サンプリングデータ数は4096個である。1回の測定での打撃回数は3回以上とし、測定結果の再現性を確認して、1回のデータを記録した

b) 実験結果

設計厚さ300mmのコンクリートでの測定振動とFFTによる周波数スペクトルの一例を図-9に、設計厚さ600mmのコンクリートでの測定振動と周波数スペクトルの一例を図-10に示す。図-9、図-10の縦軸は振幅の最大値で標準化した任意の単位である。

図-9より、設計厚さ300mmのコンクリートでは、鋼球

直径8mmでは7kHz程度、15kHz程度、28kHz程度の振動が、鋼球直径20mmでは7kHz程度の振動が入力面、背面側ともに測定されている。また、図-10より、設計厚さ600mmのコンクリートでも同様に入力面、背面側とも同一の周波数帯域の振動が測定されている。つまり、2章(2)節での実験結果のとおり、入力面側に設置した受信点での周波数スペクトルは鋼球直径、入力波長によって変化するが、入力面と反対側の背面側に設置した受信点においても、入力面側の入力波長の変化に対応した振動が測定されていることが確認された。

この結果から、コンクリート表面を鋼球で打撃して発生する縦弾性波はコンクリート内部を伝搬して背面側に到達するが、ここで到達する振動は、減衰を伴いながらも鋼球打撃時に入力面側に発生した振動と同様の形状の振動であると推定される。

この推定結果を検証するため、式(4)における $y_1(t)$ を入力面側に設置した受信点での測定振動、 $y_2(t)$ を背面

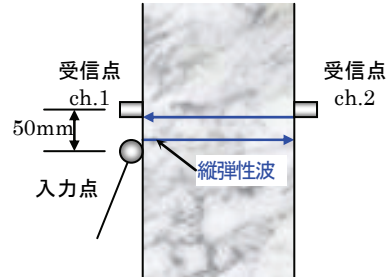


図-8 入力面と背面側で測定される振動の比較状況

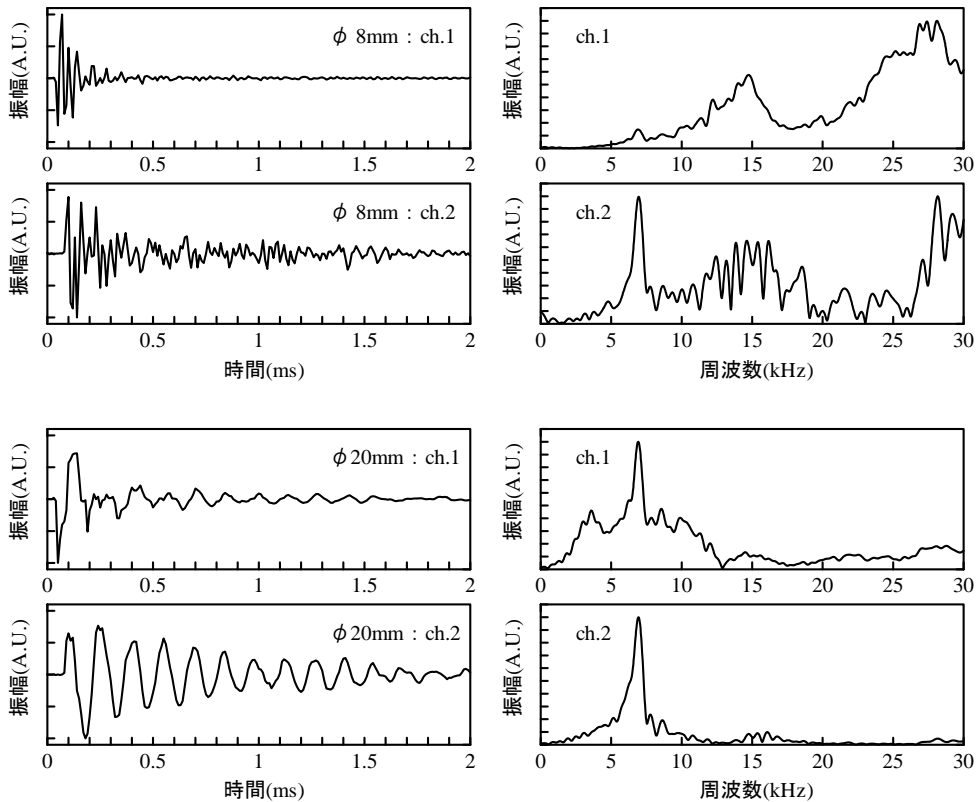


図-9 縦弾性波の入力面側と背面側での測定振動(左図)と周波数スペクトル(右図)の比較(設計厚さ300mm)

側に設置した受信点での測定振動として、初期振動と背面側に設置した受信点での測定振動の相互相関関数を求めた。これにより、入力面側で測定された縦弾性波の入力時の測定振動と同様の振動がコンクリートの背面側でも測定されているのかと、その場合の到達時間差が確認できる。

各コンクリート、各鋼球での相互相関関数の計算結果を図-11に示す。図-11より、鋼球直径に関わらず、設計厚さ300mmのコンクリートでは時間差0.05ms付近で、設計厚さ600mmのコンクリートでは時間差0.13ms付近で入力波形と背面側に設置した受信点での測定振動との相関係数は-1程度と高くなった。これから、コンクリー

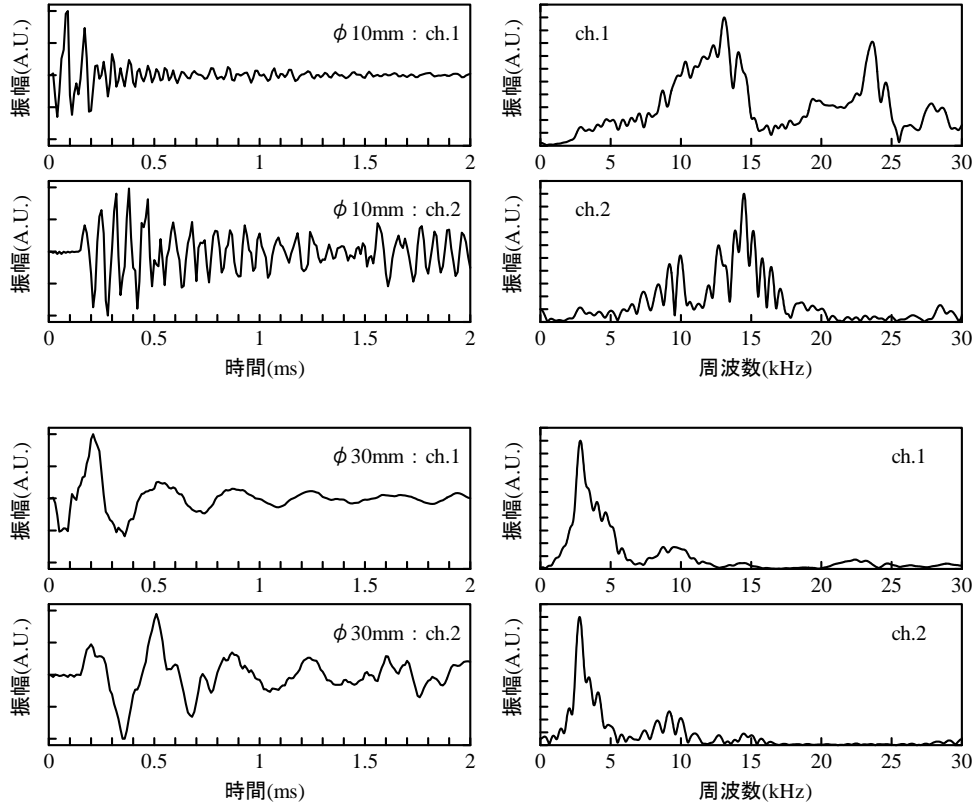


図-10 縦弾性波の入力面と背面側での測定振動（左図）と周波数スペクトル（右図）の比較（設計厚さ600mm）

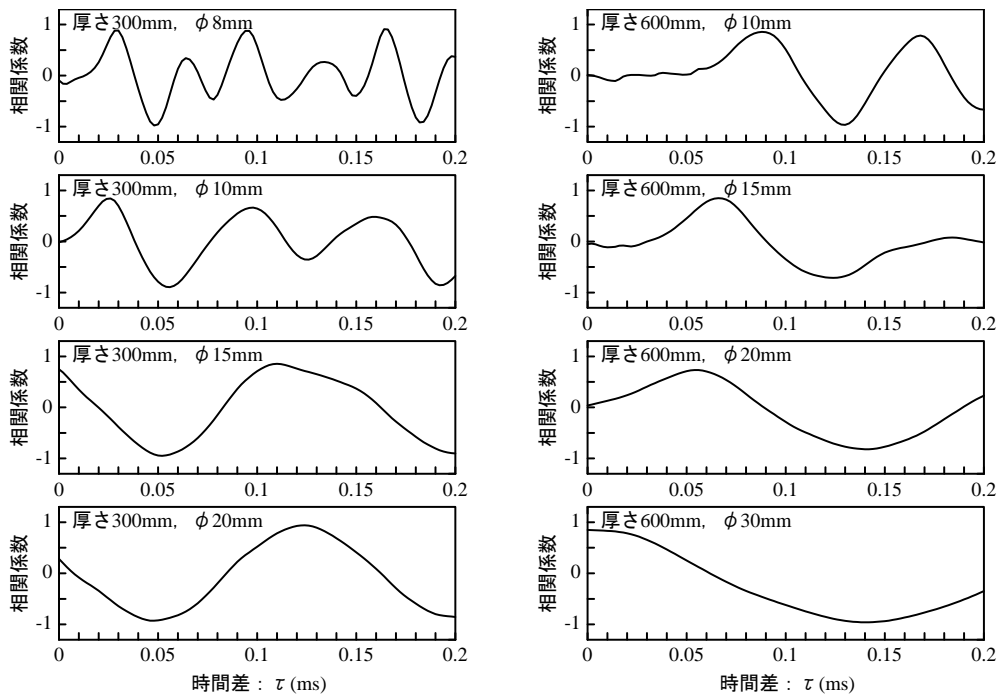


図-11 入力面側の初期振動と背面側の測定振動との相互相関関数（左図：設計厚さ300mm、右図：設計厚さ600mm）



トの背面側での受信点では、これらの時間差において入力面側で測定された初期振動と同様の振動が測定されていることが確認された。なお、入力点側と背面側では加速度センサーの設置向き（感度軸の方向）が異なることから、測定振動の符号は反転し、相関係数が-1で同振動が測定されていることを示す。

また、入力面側で測定された初期振動は振幅が大きくレイリー波として到達した振動、背面側の受信点で測定された振動は縦弾性波として到達した振動であると考えられるが、この時、入力面側の受信点と背面側の受信点での振動の到達時間差  $\Delta T$  は式(5)により示される。

$$\Delta T = \frac{\sqrt{D^2 + L_1^2}}{V_p} - \frac{L_1}{V_R} \quad (5)$$

ここに、 $\Delta T$  は到達時間差、 $L_1$  は入力点と受信点 ch.1 までの距離、 $D$  はコンクリートの厚さ、 $V_p$  は縦弾性波速度、 $V_R$  はレイリー波速度である。

縦弾性波速度を表-1 に示した速度、レイリー波速度を縦弾性波速度の 0.56 倍であるとすると<sup>10)</sup>、入力面側の受信点と背面側の受信点での入力波形の到達時間差  $\Delta T$  は設計厚さ 300mm のコンクリートでは 0.05ms、設計厚さ 600mm のコンクリートでは 0.15ms となり、実際に相関係数が高くなった時間差と一致する。

以上の結果より、縦弾性波が背面側に到達すると、鋼球打撃時に入力面側に発生した振動と同様の振動が背面側に到達していることが検証されたものと考えられる。

#### (4) 同一表面の受信点で測定される振動の検証実験

##### a) 実験内容

前節では、縦弾性波がコンクリートの背面側に到達すると、入力面側で測定された縦弾性波の入力時の測定振動と同様の振動が背面側に到達していることが検証された。次に縦弾性波はコンクリートの背面側で反射して、再び入力面側に到達し、入力面側と背面側で多重反射を繰り返すが、この場合に入力面で測定される振動を確認するため、本節では、図-12に示すとおり、入力面側に受信点を2点設置し、これら2点の受信点での測定振動と

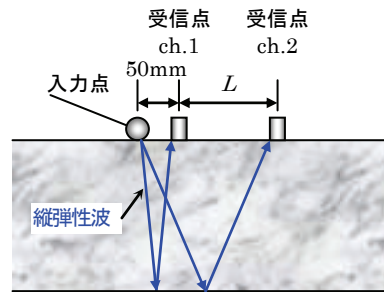


図-12 同一表面で測定される振動の比較状況

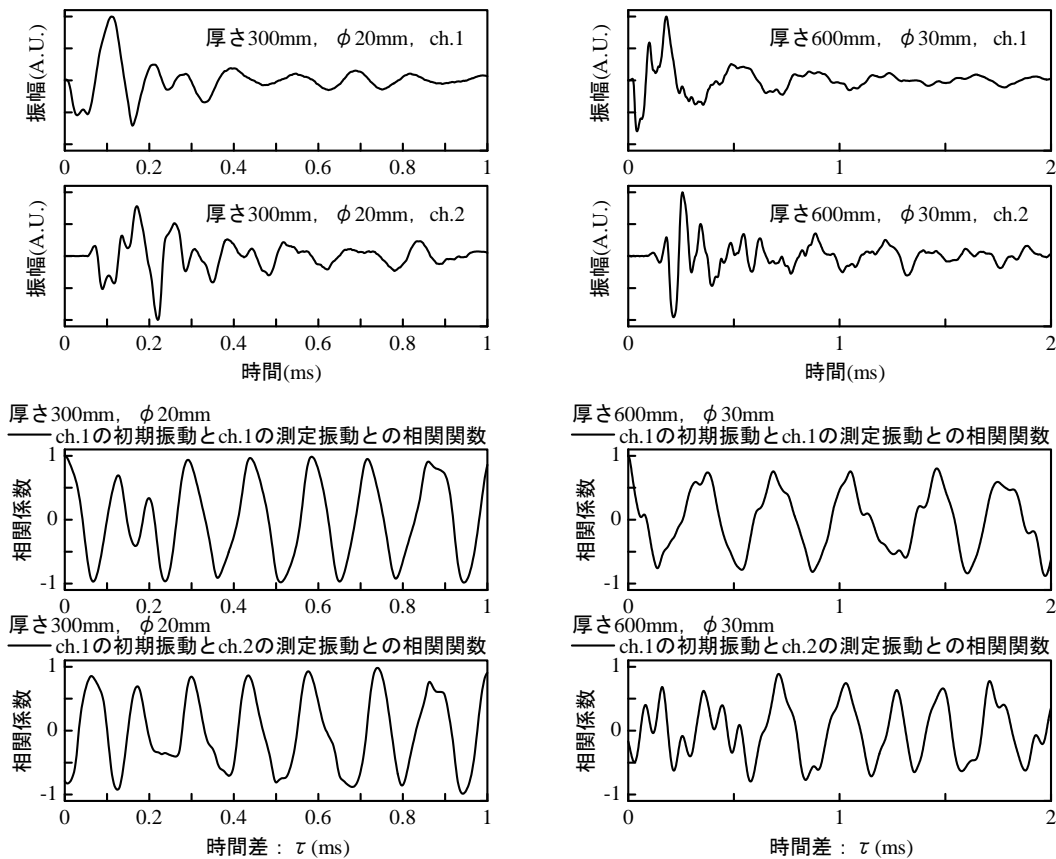


図-13 同一表面で測定される振動（上図）と打撃点側の受信点での初期振動との相互相関関数（下図）  
（左図：設計厚さ300mm、右図：設計厚さ600mm）

打撃点側の受信点 (ch.1) で測定された初期振動との相互相関関数を求めた。なお、受信点ch.1とch.2の距離 $L$ は設計厚さの0.5倍とした。

**b) 実験結果**

前節と同様に、 $y_1(t)$ をch.1の測定振動、 $y_2(t)$ をch.1の測定振動、または、ch.2の測定振動として、ch.1で測定された初期振動とch.1の測定振動、または、ch.2の測定振動との相互相関関数を式(4)により求めた。

この結果を図-13に示す。ch.1の初期振動と入力点から離れたch.2の測定振動との相互相関関数を見ると、初めて相関係数が1程度と大きくなる時間差は、設計厚さ300mmのコンクリートでは0.08ms程度、設計厚さ600mmのコンクリートでは0.20ms程度である。なお、本測定ではch.1とch.2の加速度センサーの設置向き（感度軸の方向）が同一であることから、相関係数が1で同振動が測定されていることを示す。この時間差は、レイリー波がch.1からch.2に伝搬する時間差を示しており、設計厚さ300mmのコンクリートではch.1、ch.2間の距離差150mmを速度1875m/sで、設計厚さ600mmのコンクリートでは距離差300mmを速度1500m/sでレイリー波が到達したことを示す。つまり、ch.2にch.1の初期振動と同様の振動が初めて測定されたのはレイリー波の到達によるものとなる。

る。

次に、レイリー波が到達した以降の時間帯では、相互相関関数は、設計厚さ300mmのコンクリート、設計厚さ600mmのコンクリートともに、相関係数が一定の時間差で高くなることから分かる。さらに、ch.1の測定振動とch.1の初期振動との相互相関関数と、ch.2の測定振動とch.1の初期振動との相互相関関数とを比較すると、相関係数が高くなる時間差に大きな差が生じていないことが確認される。

これらから、レイリー波が到達した以降の時間帯では、ch.1の測定振動とch.1の初期振動との相互相関関数と、ch.2の測定振動とch.1の初期振動との相互相関関数ともに、相関関数が高くなる時間差はコンクリート背面で反射した縦弾性波が入力面側に到達した時間差を示しているものと考えられる。この理由は、縦弾性波は入力面側と背面側で多重反射を繰り返すことから、一定の時間間隔で縦弾性波は入力面側に到達する。これは、相関係数が一定の時間差で高くなった結果と一致する。次に、図-12より、縦弾性波の往復距離は、例えば設計厚さ300mmではch.1で602mm、ch.2で632mmと、ch.1、ch.2では大きな差が無く、到達時間差に大きな差は無い。これは、ch.1の測定振動とch.1の初期振動との相互相関関数と、

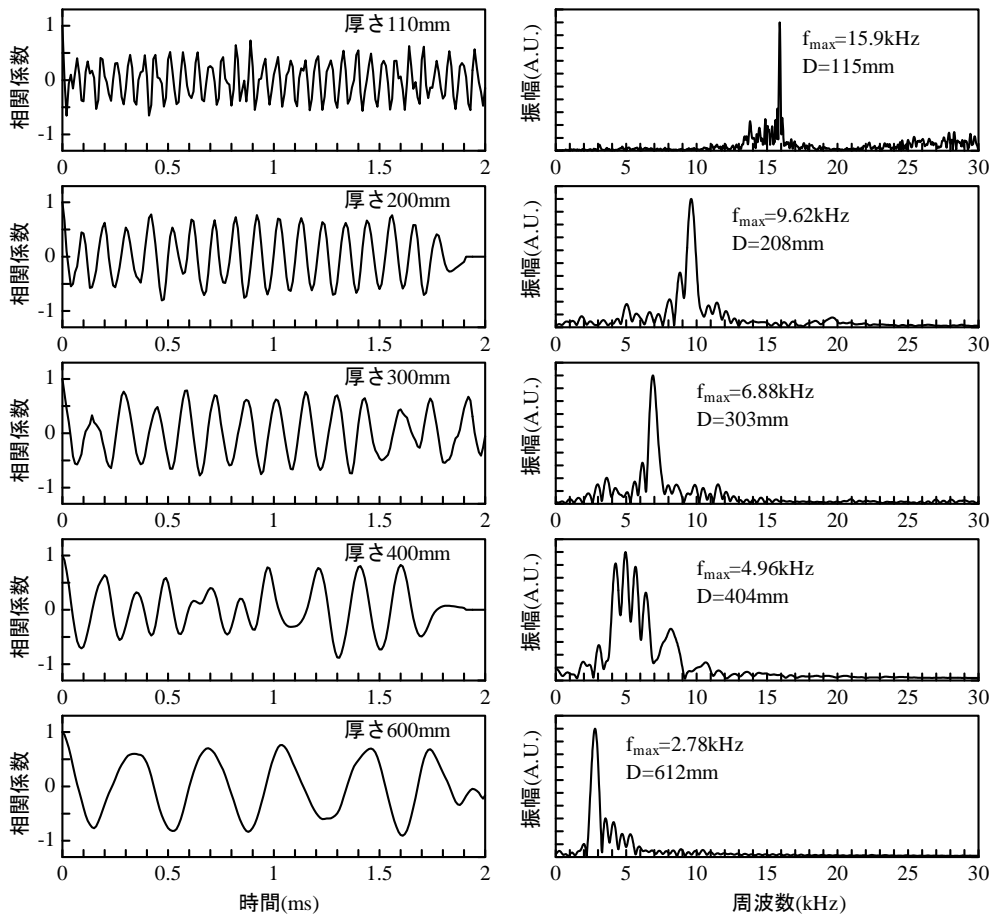


図-14 設計厚さ110mm～設計厚さ600mmのコンクリートでの相互相関関数（左図）および相互相関関数を利用した周波数スペクトル（右図）

ch.2の測定振動とch.1の初期振動との相互相関関数ではほぼ同じ時間差で相関係数が高くなった結果と一致する。

以上の結果から、弾性波の入力面と同一の表面に受信点を設置して測定された振動から、初期振動と測定振動との相互相関関数を求めれば、縦弾性波が多重反射して到達する度に相関係数が大きくなることが確認された。これにより、相互相関関数では縦弾性波の往復時間と一致する周期性が存在し、さらに、式(4)により求められる相互相関関数は、分母の計算により波形の減衰を反映することなく、縦弾性波が多重反射して到達する度に相関係数が大きくなる。これから、相互相関関数に対してFFTを実施すれば、2章において指摘した測定振動の減衰の影響による測定誤差を解消して、縦弾性波の多重反射による周波数を正確に求められるものと考えられる。

(5) 相関関数を利用したFFTによる再解析

前節の結果より、図-6、図-7に示した測定振動に対して、初期振動と測定振動との相互相関関数を求め、相互相関関数に対してFFTにより周波数スペクトルを求めた。この結果を図-14、図-15に示す。

図-6、図-7に示した測定振動に対するFFTによる解析結果と比較すると、縦弾性波法の多重反射により生成される周波数を測定できなかった厚さ1900mm、2400mmにおいても縦弾性波の多重反射による周波数を測定することが可能となった。また、多重反射による周波数成分の振幅値は相対的に大きくなり、より明確になっている。

前節に示したとおり、相互相関関数では縦弾性波の減衰による影響を反映しないことから、FFTで誤差要因となる波形の減衰の影響を除去したものと考えられる。

4. まとめ

衝撃弾性波法の多重反射法での周波数解析方法について、一般に利用されているFFTの誤差要因や適用限界などについて検討し、この誤差要因や適用限界を解消する方法として提案されている相関関数を利用した周波数解析方法について、この方法が成立する基本的な測定原理や適用できる部材厚さの変化等の有効性を実験により検証した。得られた見解を以下に示す。

- 1) FFTによる周波数解析での誤差要因に波形の減衰によるものがあり、この影響を除去することが重要な課題となる。具体的な影響としては、部材厚さの厚いコンクリートにおいて、鋼球打撃による縦弾性波の入力時の振動しか測定されずに縦弾性波の多重反射による周波数を測定できないことが確認された。
- 2) 縦弾性波の入力面と反対面の背面側では、入力面と同様の周波数成分の振動が測定された。また、背面側で入力面側の初期振動と同様の振動が測定された時間は、縦弾性波の背面側への到達時間と一致した。これから、コンクリート内部を伝搬した縦弾性波が背面側に到達すると、鋼球打撃時に入力面側に発生した振動

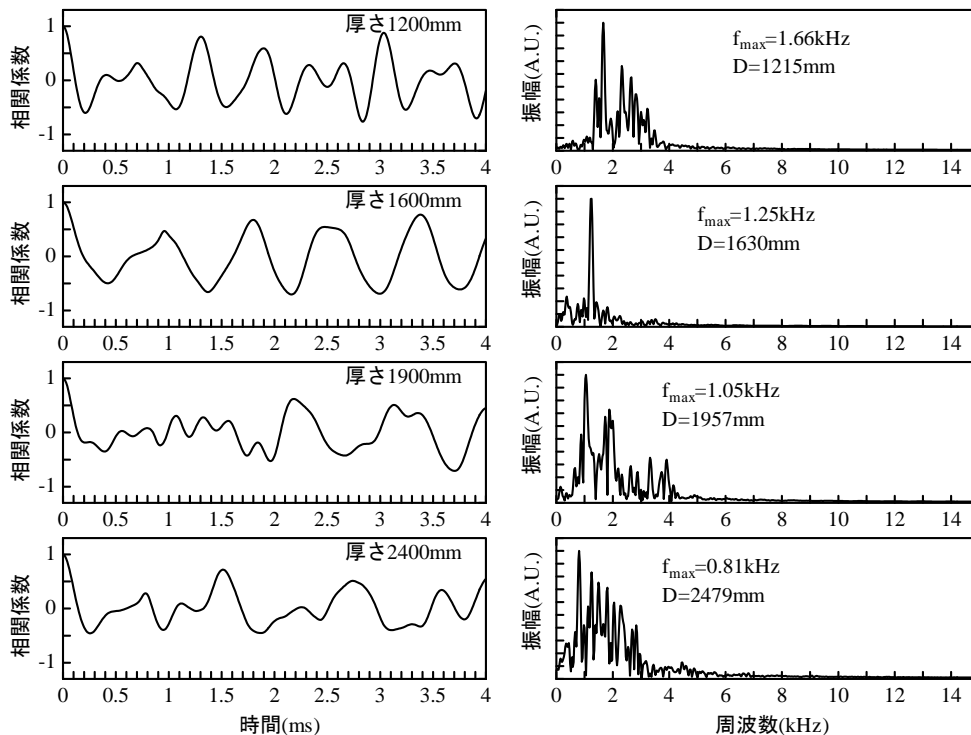


図-15 設計厚さ1200mm～設計厚さ2400mmのコンクリートでの相互相関関数 (左図) および相互相関数を利用した周波数スペクトル (右図)

と同様の振動が背面側に到達するものと考えられる。

- 3) 縦弾性波の入力面に受信点を設置し、初期振動と測定振動との相互相関関数を求めると、相関関数が高くなる時間差はコンクリート背面で反射した縦弾性波が入力面側に到達した時間差であることが確認された。これから、相互相関関数において縦弾性波の往復時間と一致する周期性を確認することができる。さらに、相互相関関数は、波形の減衰を反映しないことから、FFTでの波形の減衰による影響を除去できるものと考えられる。

以上の結果より、多重反射法による周波数解析方法として一般に利用されているFFTでは、部材厚さの厚いコンクリートでの適用に限界があると考えられる。一方、提案されている相関関数を利用した周波数解析方法での前提条件である、背面で反射した縦弾性波が表面に到達した時に測定される振動は、入力時に測定される振動と同様の形状の振動であるということが、今回の実験により検証された。

実際に、厚さ110mm~2400mmのコンクリートにおいて、初期振動と測定振動との相互相関関数を求め、相互相関関数に対してFFTにより周波数スペクトルを求めると、一般に利用されているFFTが適用できなかった厚さ2000mm程度以上のコンクリートにおいても、縦弾性波の多重反射による周波数を測定することが可能となった。また、一般に利用されているFFTでの解析結果と比較すると、多重反射による周波数成分の振幅値は相対的に大きくなり、より明確になった。

これから、測定振動の第一波から縦弾性波の入力時の振動である初期振動を設定し、この初期振動と測定振動との相互相関関数を求め、この相互相関関数に対して

FFTを実施する解析方法は、FFTの誤差要因を解消する有効な解析方法になると考えられる。

#### 参考文献

- 1) NDIS 2426-2: コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第2部: 衝撃弾性波法, 2009.
- 2) 岩野聡史, 森濱和正, 極檀邦夫, 境友昭: 衝撃弾性波法を適用した新設コンクリート構造物での圧縮強度推定および内部欠陥探査に関する検討, 日本非破壊検査協会 コンクリート構造物への非破壊検査の展開論文集(Vol.2), pp.475-482, 2006.
- 3) ASTM-C1383-04: Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method, 2004.
- 4) 独立行政法人土木研究所, 社団法人日本非破壊検査協会: 非破壊・微破壊試験によるコンクリート構造物の検査・点検マニュアル, pp.181-184, 大成出版社, 2010.
- 5) 岩野聡史, 極檀邦夫, 境友昭, 森濱和正: 衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp.547-552, 2001.6
- 6) NDIS 2426-1: コンクリート構造物の弾性波による試験方法—第1部: 超音波法, 2009.
- 7) Carino, N. J., Sansalone, M. and Hsu, N. N.: A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete, *ACI Journal*, Vol.83, pp. 199-208, 1986.
- 8) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 88 コンクリート構造物の非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会(339委員会) 成果報告書, pp.78, 2009.
- 9) 日野幹雄: スペクトル解析(新装版), 朝倉書店, 2010.
- 10) 山下健太郎, 境友昭, 極檀邦夫, 森濱和正: 空洞がコンクリートの弾性波速度に及ぼす影響, 日本非破壊検査協会平成18年度秋季大会講演概要集, 2006.

(2010.9.22 受付)

## A STUDY OF FREQUENCY ANALYSIS METHODS FOR VIBRATION GENERATED BY IMPACT ON THE SURFACE OF THE CONCRETE

Satoshi IWANO and Kazumasa MORIHAMA

Impact Elastic Wave Method is a non destructive test method for concrete structures. In Impact Elastic Wave Method, Fast Fourier Transform (FFT) has mainly been used for measuring the frequency with which elastic wave is reflected between the opposite surfaces of a concrete plate, and if the velocity of elastic wave is known, the thickness of concrete plate can be calculated by this measured frequency. In this paper limitation of measuring by using FFT is discussed and other frequency analysis method that uses cross-correlation function and FFT is studied. As a result, the attenuation of reflected elastic wave was found to be the major drawback to determination of the frequency. In concrete plate whose thickness is 2m or greater, the thickness of concrete plate can not be measured by using FFT. On the other hand, the cross-correlation function that is calculated by the initial portion of the waveform relate to the arrival time of the reflected elastic wave without influence of the attenuation. It was concluded that the frequency analysis method using cross-correlation function and FFT can be an effectual method for measuring the frequency and the thickness of concrete plate.