

多重反射現象に関するインパルス応答の適用性に関する理論的検討

Theoretical Consideration on Applicability of Impulse Response to Impact Elastic Wave Analysis

○山下健太郎^{*1}・境 友昭^{*2}

Kentaro YAMASHITA, Tomoaki SAKAI

要旨：衝撃弾性波法には、インパルス応答(周波数応答)を基本とする Impact Echo 法系統の解析方法のみならず、多重反射による定在波の生成を基本とする iTECS 法がある。測定した応答波形の周波数分析を行うという解析方法の形式は同じであるが、両者には原理的な違いがある。本論では、インパルス応答を元に応答波形を算出し、多重反射によって定在波が観測される場合であっても、インパルス応答が再現できない限界があることを示す。また、入力信号の周波数範囲を適切に選択しないと、多重反射による定在波の基本周波数が第一位の周波数とならない場合があることを示し、周波数応答解析方法の適用性に関する検討を行う。

キーワード：衝撃弾性波法、インパルス応答、厚さ測定

1. はじめに

衝撃弾性波法による板状コンクリート構造物の厚さ測定では、厚さ方向に伝搬する波動の多重反射による定在波の周波数(簡単に板の基本周波数という)を測定する方法が広く用いられている¹⁾²⁾。この方法では、板状コンクリートの振動応答を入力と同じ面で測定する。また、一般的には、振動応答は測定するが、入力信号を測定することは少ない。さらに、振動応答として、変位成分を測定する方法(Impact Echo 法)と振動速度成分を測定する方法(iTECS 法)があり、中には、振動応答の測定に加速度計を使用することから、加速度成分を応答信号として分析の対象とすることも行われている。

Impact Echo 法が、変位成分を振動応答の測定量としている理由は次のように考えられる。すなわち、弾性体の表面を打撃した時に発生する変位は、パルス状となり、その周波数特性は、入力信号周期の 1/2 に相当する周波数以下においてほぼ平坦であるから、コンクリート板の周波数応答関数(伝達関数)を推定するに好都合である、という点である。つまり、入力信号がパルスであれば、測定した応答信号自体がシステムのインパルス応答に相当し、そのフーリエ変換が周波数応答関数だからである。一方、iTECS 法は多重反射による入力波と反射波の重畳によって定在波の生成が早くなることを期待し、振動速度成分を測定量としている。

本文では、インパルス応答の理論に基づいてコンクリート板の振動応答波形を求め、多重反射現象による

板の厚さ測定方法へのインパルス応答解析の適用条件、また、衝撃弾性波法の適用範囲についての検討も行う。

2. 多重反射

2.1 多重反射のインパルス応答

板状コンクリート構造物の厚さ測定で期待している多重反射現象は、打撃力を入力面と、これに平行な対向反射面が共に振動に対して自由面であることを前提としている。二つの反射面が平行であることから、入力された弾性波は入力点と対向反射面での入力点の平面投影位置の間を伝搬する波動として取り扱うことができる。入力点から斜め方向に入射した波動は、再び入力点に戻る経路を取らないからである。多重反射は、波動が伝搬する経路を擬似的に線(音線)で表現すると、その経路が閉じている場合に成立する現象である。板状構造物の厚さ方向では、進行波(入力点から反射面方向に向かう波動)と後退波(反射面から入力面方向に向かう波動)が同一経路を通るため、波動の通過経路は閉じており多重反射現象が発生する。

インパルス応答は、インパルス(理論的には時間幅が 0 で、振幅が 1 の信号)信号が入力されたときのシステムの応答であり、板状コンクリート構造物の振動速度に対するインパルス応答は、

$$h(t) = \frac{1}{4\pi ND} \begin{cases} t = \frac{2ND}{c_p} \\ h(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

である。ここで、 N は反射回数、 D は板の厚さ、また c_p はコンクリート板の縦弾性波速度である。図-1は、式(1)を図として示したものである。パルスが時間に対して等間隔に並び、その大きさは時間とともに低減している。図では、板の厚さを400mm、コンクリートの縦弾性波速度を4,000m/sとしている。測定面に入力された信号は、対向面で反射して再び測定面に到達するが、その時間間隔は、波動が板の厚さ方向に1往復する時間である。波動に分散性がないことを前提とすれば、その時間間隔以外での反射波の到達はない。このため、インパルス応答は、時間的に等間隔なパルストレーンとなる。振幅が減衰するのは、式(1)にも示されるとおり、波動が空間に広がる幾何減衰によるものである。コンクリート内の波動の減衰では、この幾何減衰以外にコンクリートの内部摩擦による減衰などもあるが、ここでは考慮していない。図に示しているインパルス応答の時間長は、5msであるが、多重反射であるから、振動が計測可能である時間で継続する。

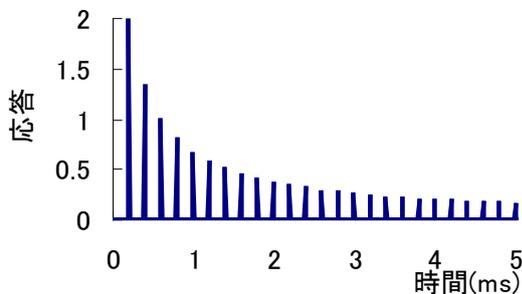


図-1 多重反射のインパルス応答

2.2 多重反射波の合成とスペクトル

式(1)のインパルス応答と任意の入力波形を合成して、衝撃弾性波法で測定される波形を計算する。出力として得られる打撃力波形 y は、入力波形 x とインパルス応答 h の畳み込み積分式(2)によって得られる。

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

(1) 入力波形

入力波形として、2種の波形を用いる。どちらも小質量のインパクトの打撃によって生成される波形であ

るが、一つは(A)打撃力波形、他は(B)打撃力波形の微分波形、である。(A)波形は、Impact Echo法が用いている変位応答に対応したもので、(B)波形は、iTECS法が用いている速度応答に対応した波形である。コンクリート表面を弾性体とみなし得る場合、打撃力波形とコンクリート表面の変位波形は相似となる。打撃力波形(変位波形)を図-2(1)、速度波形を図-2(2)に示す。図では、波形の継続時間を0.2msとしているが、数値計算では、これらの波形の継続時間を変化させている。

多重反射現象では、信号入力を行う測定面に一定の時間間隔で反射波が到達し、その反射波は測定面で再び反射して対向面に向かう。このため、打撃によって外部から印加された入力信号は、図-2のとおりであるが、システムとしての入力信号は、図-2に示す波形が、多重反射の基本周期で繰り返されることになる。

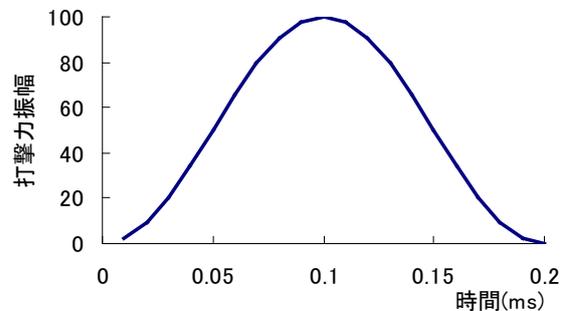


図-2(1) 打撃力波形

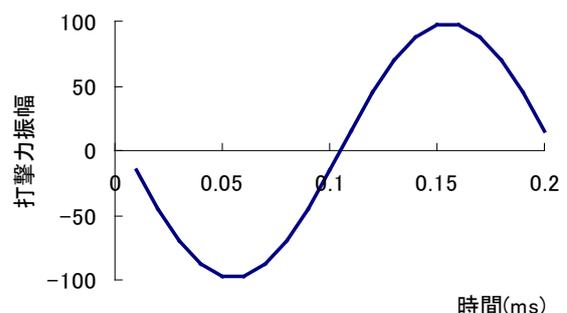


図-2(2) 打撃時の速度波形

(2) 応答波形

数値計算によって求めた応答波形を図-3に示す。(1)は、変位応答、(2)は速度応答波形である。変位応答波形が、正の方向成分のみとなるのは、入力波形が正の値のみを持つためである。圧電素子をセンシングデバイスとして用いた測定装置で現実に観測される波形では、DC成分が通過出来ないため、正負の振幅を持つ波形となる。速度応答波形の場合には、入力が正負の両

*1 (株) 東洋計測リサーチ Toyo Measurement and Research Inc.

*2 アプライドリサーチ (株) Applied Research Inc.

振幅波形であることから出力波形も同様に正負両振幅の波形となる。図-3は、一般的に、内部欠陥などが無い理想的な状態で測定される波形を示している。なお、この図の計算では、インパルス応答の周期と、入力波形の時間長を合致させており、特に速度応答波形では、あたかも減衰を持つ正弦波のような波形となっている。また、多重反射を前提しているため、入力波形は、図-2に示すような波形が周期的に繰り返されるとして計算している。

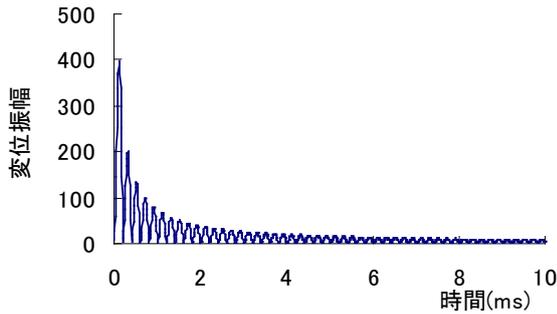


図-3(1) 変位応答波形

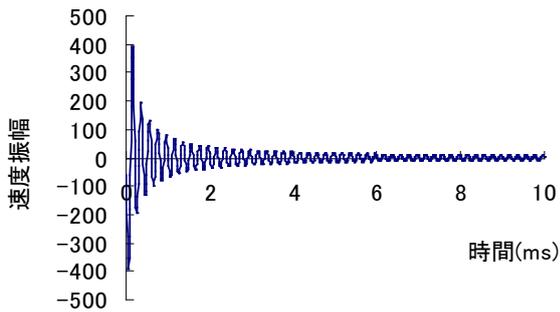


図-3(2) 速度応答波形

(3) パワースペクトル密度関数

衝撃弾性波法では、測定した応答波形のパワースペクトルから、スペクトルパワー密度が最大となる周波数を第一位の周波数 f_0 とし、

$$D = \frac{c_P}{2f_0} \quad (3)$$

式(3)によってコンクリート板の厚さ D を推定する。変位応答の場合、第一位の周波数は 0 近傍となるが、これは図-3(1)の波形で平均値が 0 になっていないことによる影響である。一方、速度応答では、5kHz に単一周波数の卓越スペクトルがあり、この周波数値を式(3)に代入すると、この事例でのコンクリート板の厚さは、当初設定どおりの 400mm となる。変位応答の場合であっても、低域での周波数成分を考慮しない場合、5kHz を卓越周波数と考えることが可能であり、同様の結果が得られる。

速度波形を用いた iTECS 法では、パワースペクトルの算出方法として、自己回帰モデルを用いているが、ここでは周波数分析方法としてフーリエ解析法のみを用いている。このような、いわば理想的な結果が得られるのは、多重反射の周期と入力信号の周期を一致させたためである。

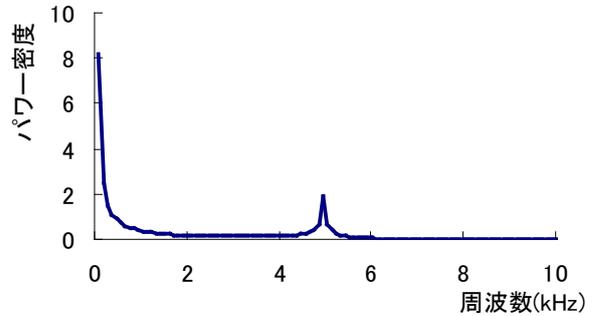


図-4(1) 変位応答のパワースペクトル

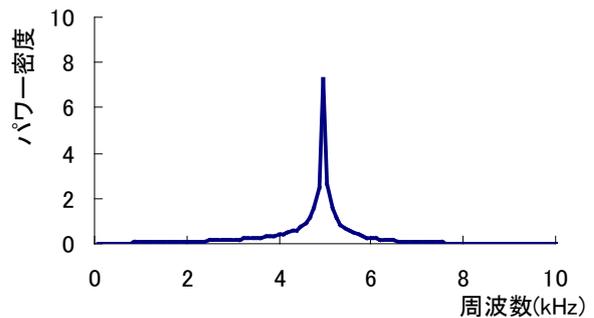


図-4(2) 速度応答のパワースペクトル

2.3 入力波形のインパルス応答の逆解析

前節では、入力信号の周期と多重反射の周期を一致させた場合の計算事例を示したが、実際的には「厚さ」が不明であるから、入力信号と多重反射の周期を一致させることは簡単ではない。

入力と出力信号が測定されている場合、応答システムが線形であれば、両者の波形からインパルス応答を求めることができる。

式(2)をフーリエ変換すると、

$$Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad (4)$$

となる。 Y , H , X は、それぞれ応答信号、インパルス応答、入力信号のフーリエ変換、 ω は角周波数である。これから、

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)X^*(\omega)}{X(\omega)X^*(\omega)} \quad (5)$$

として、インパルス応答のフーリエ変換が得られる。

なお、*は共役複素数を意味する。インパルス応答は、式(5)の H を逆フーリエ変換して算出される。

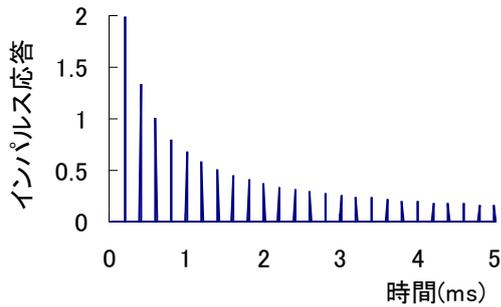


図-5 インパルス応答の計算値

図-5 にインパルス応答の計算結果を示すが、図は波形計算に用いたインパルス応答(図-1)と等しく、つまり、この入力信号を用いた場合には、測定波形(応答波形)のパワースペクトルから第一位となる周波数を求め、式(3)にその周波数を代入して厚さを求める方法でも、インパルス応答のパルストレインの周期から厚さを求める方法でも、同様の結果を与えることがわかる。

2.4 入力波形の影響

前節では、入力信号の周期が、多重反射周期と一致する場合について示した。しかし、大津ら³⁾は、小質量のアルミ飛翔体と称するインパクトを用いて接触時間の短い、高周波数の入力信号を用いる方法を試みている。この背景には、入力信号をインパルスとみなし得る形状にすれば、出力信号がシステムのインパルス応答と等価となる、という考えがある。

ここでは、入力信号の周波数が出力信号のパワースペクトルあるいはインパルス応答の計算値に与える影響について、数値計算により考察する。なお、以降の計算では、入力信号として速度波形を用いている。

(1) 入力信号の周波数が高い場合

入力信号の周期を多重反射周期の 1/2 として出力波形を生成し、そのパワースペクトル、インパルス応答の計算を行った。

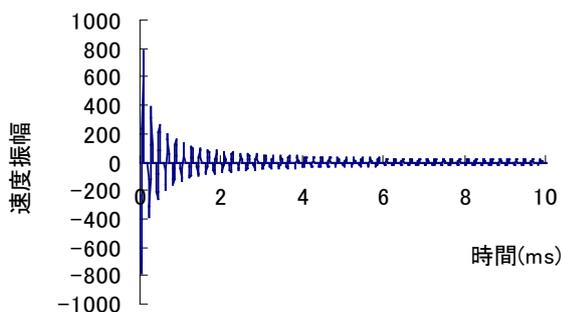


図-6 短周期信号入力時の速度応答波形

図-6 は、速度応答波形を示す。入力の周期が短くなっているため、図-3(2)の減衰正弦波状の波形とはやや様相が異なる。

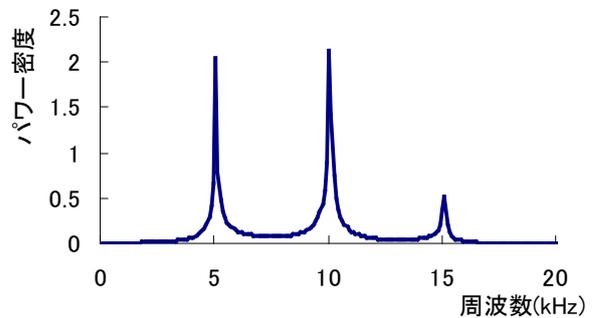


図-7 速度応答のパワースペクトル(高周波信号入力)

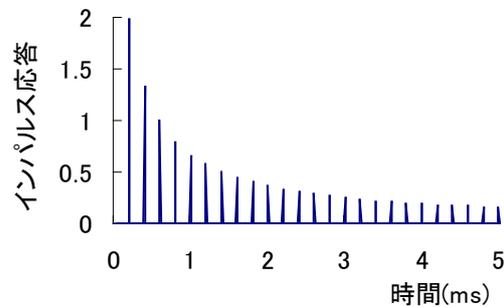


図-8 インパルス応答の計算値(高周波信号入力)

図-7 に応答波形のパワースペクトル、図-8 にインパルス応答の計算値を示す。インパルス応答は、図-1、図-5 と等しく、高周波の信号を入力しても、インパルス応答解析では、コンクリート板の厚さを正しく測定できることがわかる。これに対し、パワースペクトルでは、多重反射の一次の基本周波数である 5kHz よりも二次高調波の 10kHz 成分が卓越し、厚さが正しく評価されないことがわかる。また、図-7 からわかるように三次高調波も観測されている。基本周波数よりも高い周波数成分がある場合、Impact Echo 法では、内部欠陥による多重反射周波数と評価する方法を用いており、図-7 の結果では、深刻な内部欠陥がコンクリート板の厚さ方向の中央に存在する、という誤った評価が行われる可能性がある。

(2) 入力信号の周波数が低い場合

ついで、入力信号の周期が多重反射周期よりも長い場合について検討する。計算では、入力信号の周期を多重反射周期と 1.2 倍とした。図-9 に応答波形、図-10 に速度応答波形のパワースペクトルを示す。また、図-11 は、インパルス応答の計算値である。

パワースペクトルでは、多重反射の基本周波数が第一位の卓越周波数となっており、周波数スペクトルが

らコンクリート板の厚さを推定する方法として妥当な結果となっている。これに対し、インパルス応答の計算値は、システムの既定値とした図-1とは明らかに異なっている。つまり、入力信号の周波数がシステムの周波数よりも低い場合には、インパルス応答による厚さの測定が成立しないことを示している。すなわち、パワースペクトルの卓越周波数から厚さを推定する方法と、インパルス応答を用いる方法では、その適用範囲に違いがあることが示される。

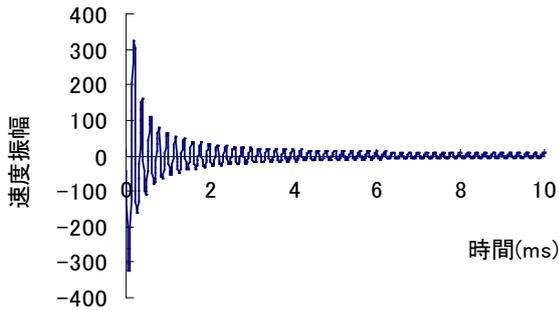


図-9 長周期信号入力時の速度応答波形

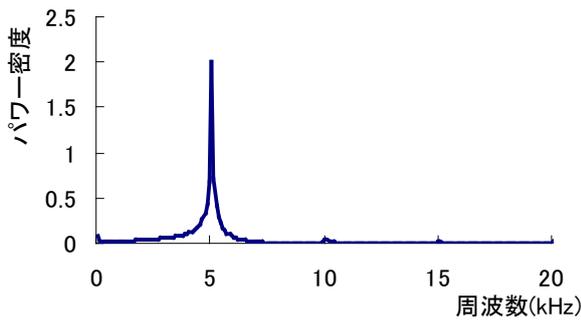


図-10 速度応答のパワースペクトル(低周波信号入力)

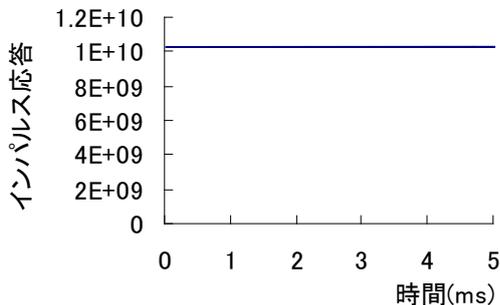


図-11 インパルス応答の計算値(低周波信号入力)

(3) 入力信号の周期と多重反射スペクトル

これまでの数値解析から、インパルス応答解析法では、入力信号の周波数が多重反射の周波数と等しいかあるいは高くないと、コンクリート板の厚さ解析方法として適用性が無いことが明らかになった。しかし、パワースペクトルを用いる方法では、入力信号の周波

数が低い場合であっても、厚さ測定に対する適用性があることがわかった。その適用範囲を検証するため、入力の周波数を変化させ、応答波形に含まれる基本周波数及び高調波成分のパワーの変化を計算によって求めた。

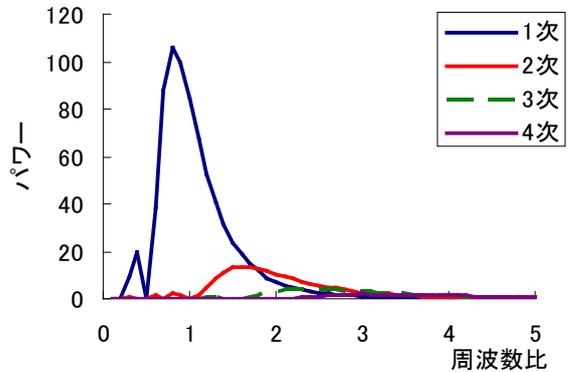


図-12(1) 周波数比と高調波成分のパワー比(変位)

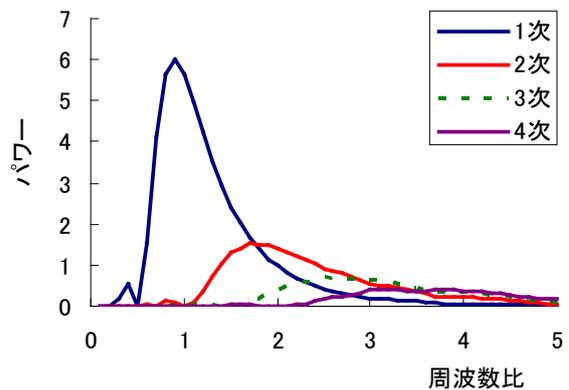


図-12(2) 周波数比と高調波成分のパワー比(速度)

図-12は、その計算結果を示すものである。図の横軸は、多重反射の基本周波数に対する入力信号の周波数の比率を示し、値が大きいほど、より高い周波数が入力されていることを意味している。縦軸は、パワーであるが、この値には相対的な意味合いしかない。変位波形を用いる手法については、波形の平均値が0とならないため図-4(1)のように低周波数域で第一位となる周波数が出現するが、図-12ではこれを除いている。図中の1次は、基本周波数であり、この場合5kHzである。基本周波数成分が最大となるのは、周波数比が0.8~0.9の範囲であり、これは入力信号の波長が多重反射の周期よりやや長い領域である。一方、2次の高調波成分が基本周波数成分を越えるのは、いずれのケースでも周波数比が1.8の場合である。つまり、入力信号の波長が多重反射の基本周期の56%以下となると、衝撃弾性波法による板状コンクリートの厚さ測定が不確定になる可能性があることが示される。また、入力信号の波

長が多重反射の基本周期の2倍となると、変位信号を用いる場合でも、速度信号を用いる場合であっても、多重反射の基本周波数が成立しないことが示される。これらの考察結果は、多重反射周波数から厚さを求めようとする衝撃弾性波法では、入力信号の周波数範囲に制限があることを示している。

3. まとめ

衝撃弾性波法による板状構造物の厚さ測定では、入力信号の波長に対して推奨範囲を設けている⁴⁾。これは本論での解析結果が示すように、入力周波数を適切に選ばないと、第一位となる周波数が厚さ方向の基本周波数とはならないためである。解析の結果わかったように、入力信号の周波数が、基本周波数の1.8倍を超えることは、好ましい結果を与えない。特に、Impact Echo法のように、基本周波数よりも高い周波数が観測された場合、その周波数に相当する「深さ」に内部欠陥があるとする考えでは、健全な構造物に対して非健全との評価を下す危険性を持っている。

本論では、また「厚さ」測定において適用可能なインパルス応答解析方法と、多重反射の基本周波数解析という二つの方法を検討したが、それぞれに適用範囲が異なることがわかった。つまり、インパルス応答解析法では、高い入力周波数を求めるのに対し、多重反射の基本周波数を求める方法では、逆にやや低めの入

力周波数を用いる方が、より明確に「厚さ」測定を可能にすることがわかった。現実的には、この両者の解析方法を併用することによって、より確実性の高い「厚さ」測定方法を確立できるものと考えられる。

また、周波数分析において、入力信号の周波数次第では厚さの基本周波数以外に多くの高調波が発生することがわかった。このことは、本論では触れなかったが、「厚さ」測定方法を内部欠陥探査に利用する場合、単に基本周波数よりも高い周波数成分が観測されたからと言って、その周波数が実際の内部欠陥に起因するものではない場合があることも明らかになった。

参考文献

- 1) M. J. Sansalone and W. B. Street: Impact-echo: Non-destructive Evaluation of Concrete and Masonry, Bullbrier Press, June 1997
- 2) 岩野聡史, 極壇邦夫, 境友昭; 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, No.1, pp.1521-1526, 2002
- 3) 例えば 渡海雅信, 大津政康: SIBIEによるひび割れ深さ評価の実用化, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.613-6180, 2007
- 4) NDIS 2426-2 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, 附属書 C, 2014