

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

Applicability of frequency controlled input signal for thickness measurement of concrete slab

○山下健太郎

KENTARO YAMASHITA

(株)東洋計測リサーチ

T.K.R Inc.

炭谷 浩一

KOICHI SUMITANI

(株)大進コンサルタント

Daishin consultants Inc.

境 友昭

TOMOAKI SAKAI

アプライドリサーチ(株)

Applied research Inc.

概 要

これまで衝撃弾性波法では、帯域周波数は異なるものの、打撃によるパルス信号を入力することを前提としており、特定の周波数成分のみを持つ入力信号を使用する方法は用いられてこなかった。

しかしながら、伝達関数を基本とした、コンクリート板の厚さ推定方法を用いたとき、入力周波数が既知であれば、その測定、解析の精度が向上する可能性が考えられる。

本論では、信号の入力方法及び測定波形の解析方法について検討した結果を報告する。

キーワード 非破壊試験, 衝撃弾性波法, 入力周波数制御, ヒルベルト変換

1. まえがき

衝撃弾性波を利用するコンクリート構造物の非破壊検査技術では、鋼球等の打撃によって入力したパルス状の弾性波の多重反射(Flutter Echo)によって生じる卓越周波数を手掛かりとして、構造物の厚さ測定、あるいは、その延長として内部欠陥の探査技術が存在し、実用されている。しかしながら、鋼球の打撃によって発生する弾性波は、コンクリート表面の状態によって周波数構成が安定せず、かつ、広帯域の周波数成分を含んでいることから、コンクリート内部での波動の散乱や、減衰の周波数特性の影響を受けやすい性質があると考えられる。このため、伝達関数解析のみでは波動の反射位置を明確にすることが難しいといった問題があり、内部欠陥の位置(深さ)やPC構造物のシーングラウトの充填状況の推定精度を難しくしている。

この問題を解決する方法として、著者らは、特定の周波数成分をもつ弾性波を発生させ、コンクリートに入力する技術について検討を行っている。本論では、長さの異なる鋼棒(以降プランジャーと称する)を鋼球で打撃し、プランジャーの共振周波数に等しいトーンバースト信号をコンクリートに入力することを試み、厚さの異なる板状のコンクリート供試体を使用して、技術の適用性について検討を行った結果を報告する。さらに、内部欠陥からの反射波を高精度に検知する方法として、周波数解析に依らず、波形の位相変化を手掛かりとする解析方法について、数値計算等によって検証を行った結果を報告するものである。

2. 実験条件および実験方法

2.1 打撃装置(プランジャー)

コンクリート部材表面に特定の周波数成分を持つ弾性波を入力するために、図1に示すような打撃機構を製作した。波動の入力は、図に示すように $\phi 12\text{mm}$ 、先端 $R=25\text{mm}$ のプランジャーをコンクリート部材に接触した状態で、プランジャーの頭部に鋼球を自由落下させて行う。鋼球の衝突によってプランジャー頭部に印加された半波正弦波状の打撃力は、1次元弾性棒と見なせるプランジャー内を多

重反射することによって、プランジャーの長さに対応する固有振動数が生成する。

従って、プランジャーの長さを変化させることにより入力する周波数を制御することが可能になると考えられる。

ここで、鋼球の打撃によって生成する固有振動数の周波数 f は、

$$f = \frac{C_p}{2L} \quad (1)$$

で表される。ここで、 C_p はプランジャーの縦弾性波速度、 L はプランジャーの長さである。

本実験では 40mm~200mm までのプランジャーを使用して測定を行った。表 1 に使用したプランジャー長さとして想定される入力周波数を示す。

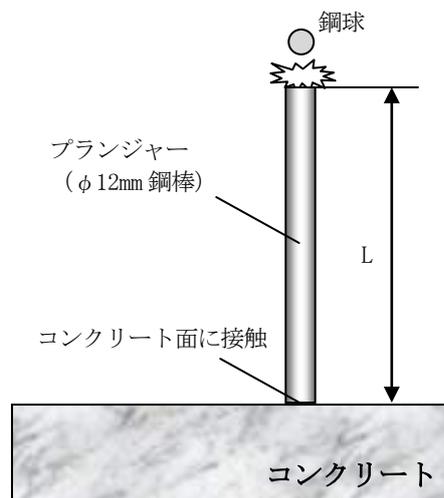


図 1 打撃装置

表 1 プランジャー種類

プランジャー長 (mm)	固有振動数 (kHz)
40	64.0
50	51.2
63	40.6
80	32.0
100	25.6
125	20.5
160	16.0
200	12.8

2.2 コンクリート供試体および測定方法

実験に使用したコンクリート供試体は、長さ 980mm、幅 60mm の土留め板 2 次製品を加工し、厚さを 250mm、300mm、350mm、400mm、450mm としたものを使用した。波動の入力は長さ方向の中央部で行い、プランジャーを手で押さえつけて設置し、頭部に鋼球（直径 4mm、8mm、12mm）を 50mm の高さから自由落下させて行った。波動の応答は、プランジャーから 30mm の位置に設置した加速度センサ（100mV/G）を用いて、サンプリング間隔 $1\mu s$ で 10ms 間収録を行った。

3. 観測波形と従来の方法による周波数解析結果

3.1 観測波形と周波数

図 2 に 350mm の供試体について測定を行ったケースでの代表的な観測波形（0~5ms 間の速度波形）とフーリエスペクトル解析結果を示す。図より、供試体厚さと異なる複数のスペクトルが観測されているものの、いずれもプランジャー長さに相当する周波数が観測されており、制御された信号はコンクリートに入力されているものと判断される。表 2 に全てのケースについて、プランジャー長さに相当する周波数の観測有無を整理したものを示す。これより、測定に際しては、プランジャー長さとして使用鋼球、あるいは測定対象部材厚さの組合せについて配慮が必要であることがわかった。

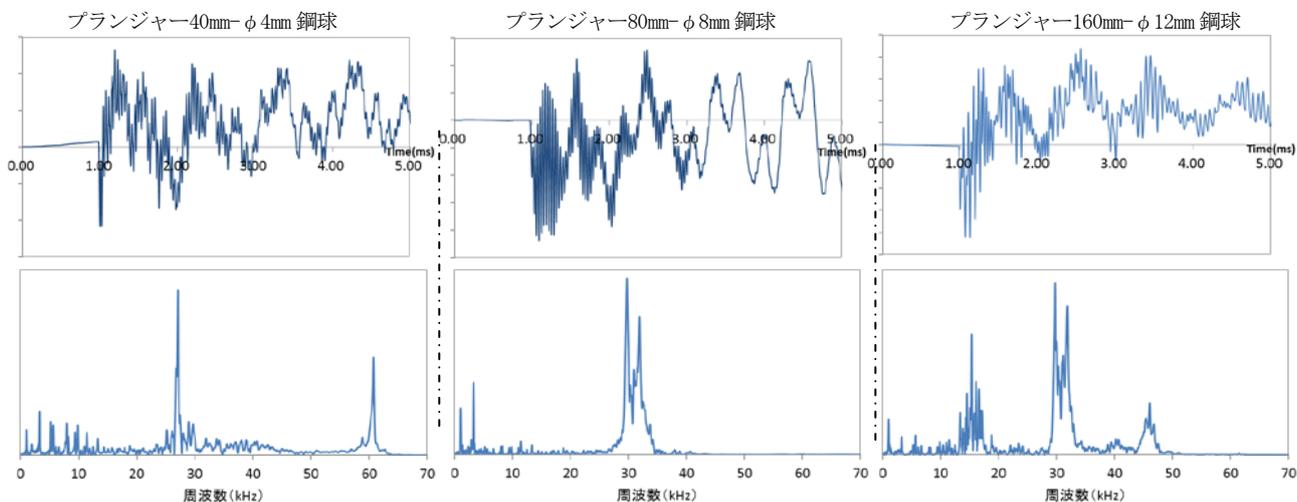


図 2 観測波形（上）及び周波数構成（下）

表2 プランジャー長さに対応する周波数の観測有無

打撃鋼球 プランジャー	供試体厚さ														
	250mm			300mm			350mm			400mm			450mm		
	φ4mm	φ8mm	φ12mm												
40mm (64.0kHz)	○	×	△	○	△	×	○	×	×	○	×	×	○	△	△
50mm (51.2kHz)	○	○	×	○	△	×	○	△	×	○	○	×	○	○	×
63mm (40.6kHz)	○	○	○	×	△	×	○	△	○	○	○	○	○	○	○
80mm (32.0kHz)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
100mm (25.6kHz)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
125mm (20.5kHz)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
160mm (16.0kHz)	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○
200mm (12.8kHz)	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

○：観測された，△：スペクトルのピークが明瞭でない，×：観測されなかった

3.2 コンクリート部材厚さ測定結果

観測波形から，従来の周波数解析を行ってコンクリートの部材厚さを求めることを試みた。0～5ms間の観測波形をMEM（最大エントロピー法）によって周波数解析を行い，(2)式で厚さの情報に変換した結果の例を図3に示す。図はプランジャー長100mmを用いたケースのものであり。図の横軸は観測波形の周波数を厚さに換算した値である。ここでは，表2に示す全てのプランジャー長さ-鋼球径-板厚さの組合せにおいても，板厚さに相当するスペクトルが観測された。つまり，入力した信号がコンクリート部材中で多重反射していることと判断される。

$$D = V/2f \tag{2}$$

ここで D は部材厚さ， V はコンクリートの弾性波速度， f は観測波形の卓越周波数である。

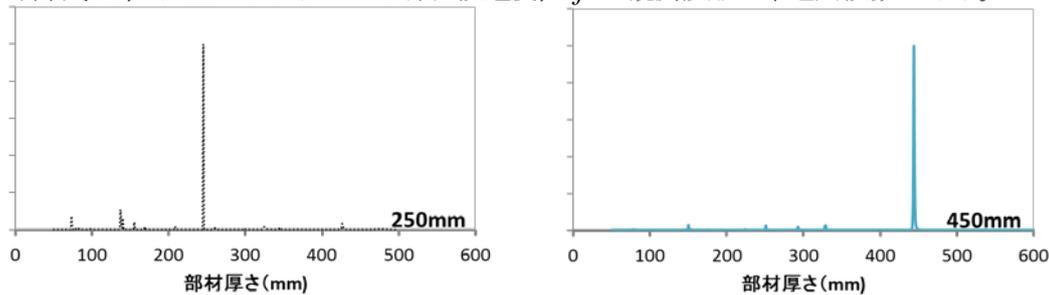


図3 MEMによる部材厚さ測定結果

4. 波形の位相変化に着目した反射位置の推定

4.1 数値計算による反射の到達時間測定方法の確認

内部に波動を反射する境界を持つコンクリート構造物（弾性波速度 4000m/s）の表面に，減衰を伴う正弦波信号を入力し，内部欠陥による反射波の遅延時間を推定する方法について，数値計算による検討を行った。内部欠陥に相当する波動の反射面の位置は，入力面から 270mm の深さとした。反射波は，入力周波数と同一の周波数を持っているが，反射して測定面に到達するときの位相は，入力波とは異なると考えられる。図4に数値計算に使用した入力波形と反射波を伴う応答波形を示す。

入力した波形は，減衰を伴うものの，正弦波から派生した波形でありその位相変化は，時間に比例している。しかし，位相の異なる反射波が重畳されると，応答波形の位相が変化する。図4において，135μs（図中丸印）において，波形の乱れが見られるが，これは位相と振幅が異なる反射波の影響である。

このような位相の変化を検出する方法としてヒルベルト変換がある。応答波形をヒルベルト変換することによって，波形の持つ振幅情報と位相情報を分離して得ることができ，ここでは位相に着目して計算を行った。図5は，ヒルベルト変換によって得られた位相の時間変化を示すものである。図の

おおよそ $135\mu s$ 付近に、位相変化の停留が見られ、この時刻は反射波の到来時刻として設定した値と一致する。すなわち、数値計算によって、位相変化が異常となる時刻から反射波の到来時刻を推定する方法の妥当性が確認された。

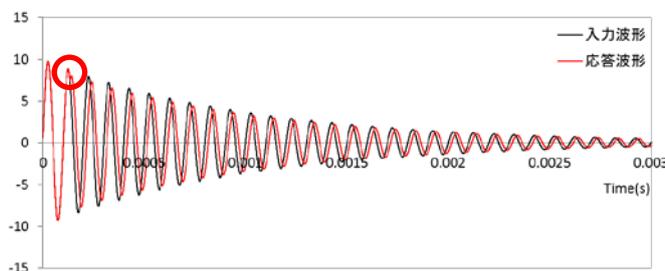


図4 数値計算に使用した波形

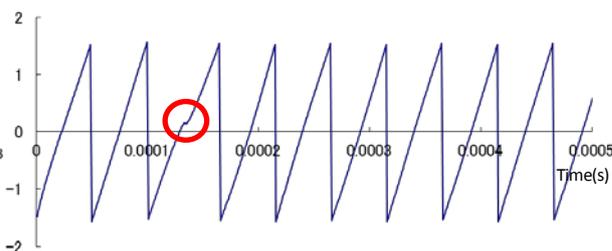


図5 測定波形(シミュレーション)の位相変化

4.2 実波形を用いた検討

図6に示す波形を対象として、ヒルベルト変換による位相の分析を行った。測定波形は、厚さ398mmのコンクリート板に約10kHzの波動を入力して得たものである。ヒルベルト変換の結果を図7に示すが、位相に異常が見られる時刻は多数存在する。現実の波形の場合、信号が発生する以前ではノイズのみがあり、ノイズが卓越する範囲では、位相の変化はランダムに近い。このため、位相変化が時間に比例する最初の時刻が信号発生時刻であり、図7から $953\mu s$ であると推定されるが、これは測定波形から読み取った波形の立ち上がり時刻 $970\mu s$ とほぼ一致する。その後の位相の変化時刻は、988, 1017, $1131\mu s$ である。中でも、 $1131\mu s$ (図中↑) での変化が大きく、この時刻で反射が到達していると考え、この場合の反射位置は、おおよそ338mmとなる。

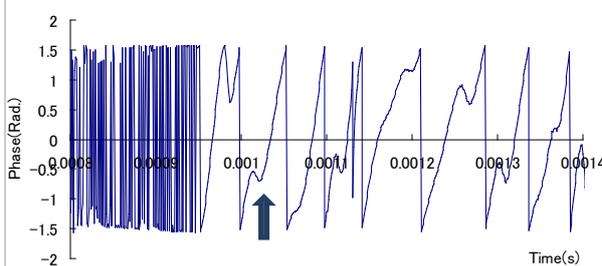
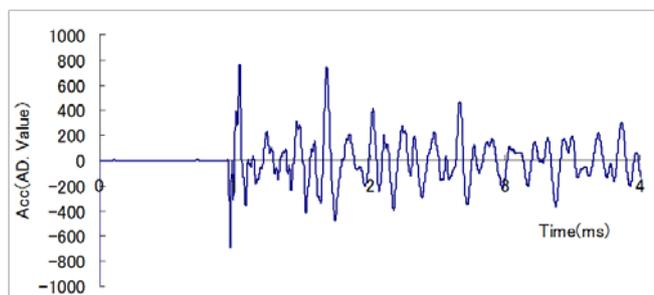


図6 解析に使用した波形(10kHz 入力, 厚さ 398mm) 図7 ヒルベルト変換での位相の時間変化

5. まとめ

衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の厚さ測定、あるいは内部欠陥探査に際し、本論では、より高精度な検知を目的として、長さの違う鋼棒を介して、単一のトーンバースト信号をコンクリートに入力することを試みた。その結果、鋼棒の長さに対応する特定の周波数がコンクリートに入力され、さらに、従来の周波数解析法によって部材厚さの測定も可能であることが確認された。また、応答波形の位相変化に着目した解析手法は、波動の反射源の位置をより高精度に検知できる可能性があることを示唆するものである。

参考文献

- 1) 岩野聡史ら：衝撃弾性波法による多重反射を利用した試験方法への位相差を利用した解析方法の提案，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集 Vol.1.5 2015年8月
- 2) 池端宏太ら：衝撃弾性波法における技術課題と開発，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集 Vol.1.4 2012年8月