

論文 超音波リアルタイム計測手法を用いたコンクリートの内部探知に関する研究

植松 恵一*1・廣瀬 正行*2・中西 三和*3・安達 洋*3

要旨：従来の巨視的探知理論を用いたコンクリート内部探知の基本原理解は，受信する広帯域成分波より表面波等の探知妨害波の強度が最も小さくなる周波数帯で狭帯域成分波を抽出するものである。この従来法を用いた探知及び波形分析に要する時間は比較的長く，実用化にあたって問題とされてきた。本研究は上記理論を発展させ上記問題点に対処し，コンクリート内部探知をリアルタイムに行うことが出来る測定法について論じ，上記測定法を用いた埋設管探知結果を示す。

キーワード：非破壊，超音波，巨視的探知理論，コンクリート，埋設管，リアルタイム計測

1. はじめに

既存コンクリート系構造物の耐震性能評価や新築建物で打設されたコンクリートの品質確認の為に，建物を傷めず調査・診断する非破壊検査法の確立は重要な課題の一つである。コンクリート内部を超音波で探知する場合，いくつかのコンクリート特有の問題点(材質，経年劣化，内部に存在する気泡，表面に生ずる無数の微細なひび割れ等)により探知が難しく，実用化に課題が残されている。

筆者らはコンクリート系構造物内部探知用に種々の問題点に対処した機能を持つ超音波内部探知装置¹⁾を用いて種々の探知物に対し，本装置の有効性の確認・探知手法の確立を目指し実用化へ向けて研究を行っている。これまでに確立した鉄筋かぶり厚探知手法や埋設管探知手法等は巨視的探知理論²⁾に基づいて行われている。

巨視的探知理論を用いたコンクリート内部探知の基本原理解は，受信した広帯域成分波から表面波等の探知妨害波の強度が最も小さくなる周波数帯で狭帯域成分波を抽出することである。この方法は波形分析にそれなりの時間を要する。

本研究は上記理論を発展させることでコンクリート内部探知をリアルタイムに行うことが出来る測定法について論じ，その測定法を用いた計測事例を示す。なお，以下に示す計測は全て上記探知装置を用いて行う。

2. リアルタイム計測

2.1 計測処理の概要

一対の発信および受信探触子の間隔を固定あるいは，はある間隔で連続移動して得られる超音波を加算平均して得る受信波を $G(t)$ とした時，対応するフーリエスペクトルを $F(f)$ を逆変換した時系列波形 $G(t)$ は(1)式で表される。

$$G(t) = \int_{-\infty}^{\infty} (F(f) \cdot e^{i\omega t}) \cdot df \quad (1)$$

探触子操作の違いから得られる幾つかの $G(t)$ 波に対して，種々のフィルター処理を施しリアルタイムにコンクリートの内部探知をする処理の概要を以下に述べる。

(1) 探知妨害波が最も小さくなる最適周波数 f_0 の算定

*1 (株)合人社計画研究所 工修 (正会員)

*2 (株)エッチアンドピースシステム 代表取締役社長 (正会員)

*3 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 工博 (正会員)

図 1 に示す探触子間隔を固定 (a1) あるいは a1 ~ a2 の範囲で連続移動させながら得られる加算平均波 $G(t)$ において、探知妨害波の強度が小さくなる低振動数の値 f_0 は(2)式で与えられる。この時の f_0 値を最適周波数と呼ぶ。

$$f_0 = \frac{cV_P}{\Delta a + \phi} \quad (2)$$

ここに cV_P はコンクリート縦波音速、 $a = a_2 - a_1$ は探触子径である。

(2) 探触子操作の違いを考慮して求めた波形に対する探知妨害波の強度が最も小さくなる最適周波数 f_R の算定

固定計測 (探触子間隔 : a1) で得られた加算平均波 $G_1(t)$ と探触子間隔を a2 として固定計測した加算平均波 $G_2(t)$ を加算平均した波形では、表面波等の探知目標以外の波形が最も小さくなる振動数 f_R が(3)式で得られる。これを第 2 の最適周波数とする。

$$f_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma \cdot cV_P}{\Delta a} \quad (3)$$

この場合の計測法を探触子間距離離散化移動計測と名づける。ここに、 γ は音速補正係数 (図 5 参照) である。

(3) 探知目標波を最も大きく励起する最も低振動数の周波数 f_D 値の算定

詳細は後述するが、計算による方法と試計測による方法がある。

(4) リアルタイム波形として抽出する狭帯域成分波の中心周波数 f_e の算定

妨害波の強度が最も小さくなる振動数 f_0 あるいは f_R と、探知目標波が最も励起される低振動数の周波数 f_D の平均の値を用いて、探知目標波の中心周波数 f_e を算定する。

(5) 妨害波を除去した波形 $GA(t)$ を抽出する演算処理

f_e を中心周波数とする狭帯域成分波を高速に求めるために使用した 3 種類の周波数フィルター $A_1(f)$ 、 $A_2(f)$ 、 $A_3(f)$ を図 2 に示した。このフィルター処理により妨害波が除去された波形 $GA(t)$ が(4)式として求められる。

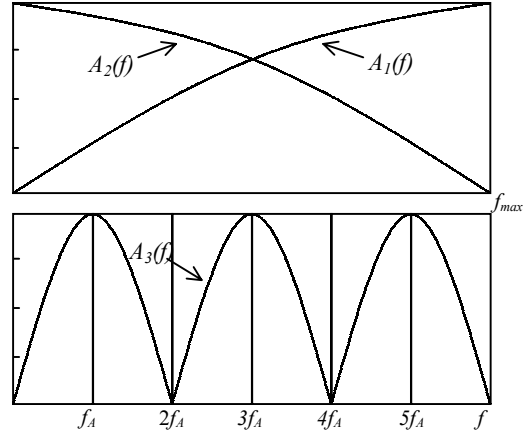
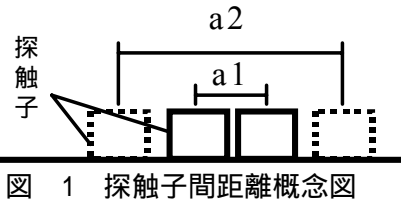


図 2 周波数フィルタ

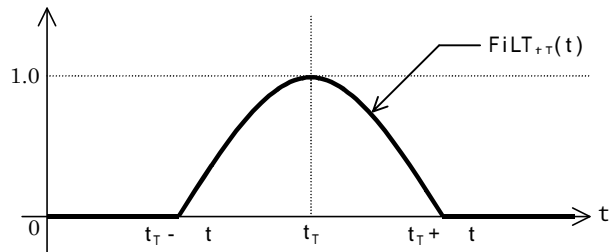


図 3 FiLT $t_T(t)$

$$GA(t) = \int_{-\infty}^{\infty} (A_1^{n1}(f) \cdot A_2^{n2}(f) \cdot A_3^{n3}(f) \cdot F(f) \cdot e^{i\omega t}) df \quad (4)$$

(6) $GA(t)$ を平滑化した波形 $GB(t)$ を抽出する演算処理

この $GA(t)$ 波の時系列上に現れた探知目標波の時刻 t_T を(5)式として求め、この t_T を中心とする時刻歴フィルター $FiLT_{t_T}(t)$ を(4)式に乘じ、平滑化した波形 $GB(t)$ が(6)式で表される。

$$t_T = 2 \times d_e / cV_P + \beta_1 \cdot 10^3 / f_0 \quad (5)$$

ここに、 d_e は探知目標波の概略路程、 β_1 は 0 ~ 2 の実数で、探知目標に応じて数値が決定される。

$$GB(t) = FiLT_{t_T}(t) \cdot GA(t) = \int_{-\infty}^{\infty} (FA(f) \cdot e^{i\omega t}) df \quad (6)$$

この処理により探知目標波が時刻歴上に顕著に抽出されることになる。

(7) 探知目標波をより鮮明に確定できる波形

GC(t)を抽出する演算処理

(6)式の $GB(t)$ 波に対応する $FA(f)$ スペクトルを、(4)式と同様のフィルター処理をすることで狭帯域における探知目標波をより鮮明に確定できる波形 $GC(t)$ が(7)式により求められる。

$$GC(t) = \int_{-\infty}^{\infty} (A_1^{n11}(f) \cdot A_2^{n21}(f) \cdot A_3^{n31}(f) \cdot FA(f) \cdot e^{i\omega t}) df \quad (7)$$

これら7つの処理の過程を組み合わせることにより、種々の状態におけるコンクリート内部探知が可能となる。また、探知目標波を高速で得ることができるという点で、この計測手法をここではリアルタイム計測と呼ぶ。次節以降に、具体例をあげながら、このリアルタイム計測の有効性と精度について検証した。

2.2 探触子間距離離散化移動計測

前節で述べたリアルタイム計測の処理方法(前節(1)~(7))を実計測による具体例により示す。図4の測定例はかぶり厚10cmの鉄筋直上コンクリート面での加算平均波 $G(t)$ より、 f_R 値を中心周波数とする狭帯域成分波を示したものである(処理(2))。細線波は探触子中心間距離を60mmとしたときの $G_1(t)$ 波であり、太線波は70mmとしたときの $G_2(t)$ 波である。早い時刻で生ずる表面波等の妨害波に位相ずれが半波生じている。しかし、探知目標波の鉄筋反射波には位相ずれが生じていない。この2つの波 $G_1(t)$, $G_2(t)$ を更に加算平均した波を $G(t)$ 波と定義すれば、鉄筋反射波が増幅し探知妨害波が大きく低減する。(3)式の第2の最適周波数 f_R 値は上記の如く $G(t)$ 波において表面波等の探知妨害波の強度が最小になる振動数である。(3)式は周波数により変化する。多くの測定実験によれば、100kHz前後の成分波では ≈ 0.74 、175kHz前後の成分波では ≈ 0.63 、250kHz前後の成分波では ≈ 0.53 が得られている。図5に値と周波数の関係を示す。以下に値がなぜ周波数で変動するかについて説明する。図6の直接波と呼ばれる203経路の妨害波は縦波、横波の混存したものになる。また202経路の妨害波の支配的成分は表面波である。これ等直接波と表

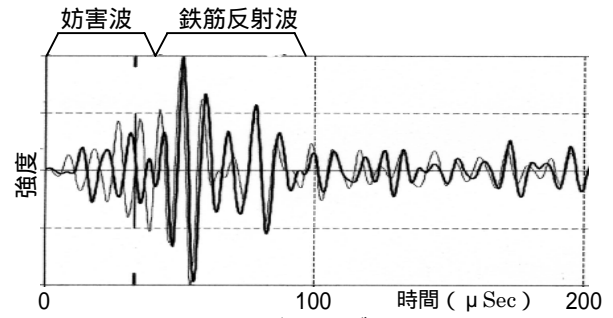


図4 位相が半波ずれた $G(t)$ 波

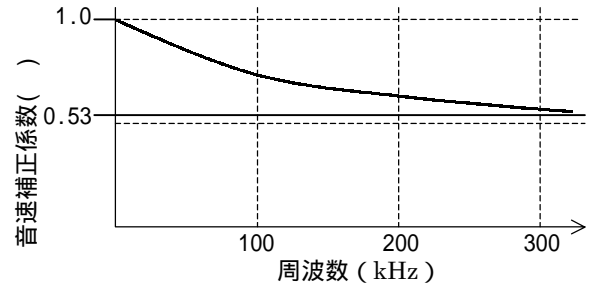


図5 - 周波数関係

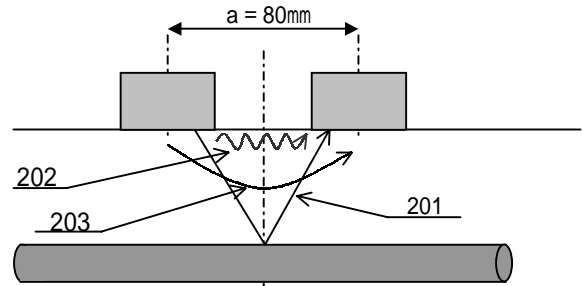


図6 超音波経路概念図
計測点

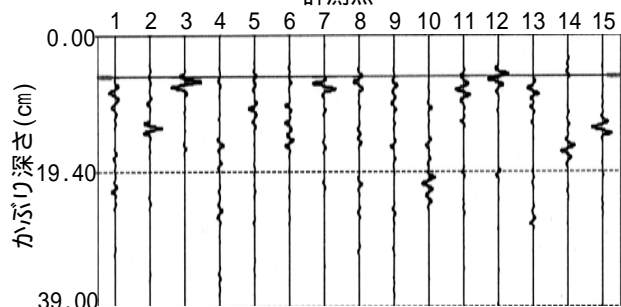


図7 $GA^2(t)$ 波(ヘアークラック有り)

面波の相対強度は周波数で大きく変化する。また、低周波になればなるほど、相対強度は直接波の方が大きくなり、高周波になると、逆に表面波の方が大きくなる。これより、前記表面波及びその表層を浅く、あるいは深く潜って伝達する直接波による合成波がコンクリート表面を伝達するものと見なした時、 $\cdot c_{VP}$ はこの場合の等価音速と考えることができる。低周波成分波の場合、直接波に含まれる音速の速い縦波成

分が増大し、結果として、 f_D 値が大きくなる。一方、高周波になると、直接波成分が相対的に小さくなり、 $f_D \cdot c_{VP}$ が前記表面波の音速 (約 $0.53 \times c_{VP}$) に漸近する。

2.3 探知目標波が相対的に大きくなる振動数 f_D

図 7 は、コンクリート表面にヘアクラックが多量にある場合の鉄筋の探知例である。測点 3、測点 8、測点 13 位置にかぶり厚 50mm で径 19mm の丸鋼が埋め込まれている。これ等鉄筋の配筋ピッチは 150mm である。相隣り合う測点の間隔は 30mm としている。径 40mm、共振振動数 500kHz の振動子を内蔵した一对の探触子をその中心間距離 70 mm に保持し、探知対象鉄筋の配筋方向に 200mm 移動させながら各々の測点で 2000 回の受信波を収録し、受信波の加算平均波 $G(t)$ を(1)式で $F(f)=1$ とする位相解析に置き換えた。本供試体の音速 $c_{VP}=3900\text{m/sec}$ 、 $\alpha=0.64$ として、最適周波数 $f_R=120\text{kHz}$ を求め、この f_R 値 (処理 (2)) を中心周波数とする狭帯域成分波 $GA(t)$ (処理 (5)) を $GA^2(t)$ 表示したのが図 7 である。同図によれば、鉄筋が直下にある測点 3、8、13 を探知できていない。つまり、無数のヘアクラックの存在で探知不能となったと考えられる。これより、鉄筋のかぶり厚 $d=50\text{mm}$ 、 $c_{VP}=3900\text{m/sec}$ 、 $\alpha=1/2$ 及び $f_R=120\text{kHz}$ を(5)式に適用し、 $t_T=30 \mu\text{sec}$ と算定し、上記 $F(f) \cdot GA(t)$ を上記 $GA(t)$ 波に乘じ、 $GB(t)$ (処理 (6)) を計算し、それに対応する $FA(f)$ を図 8 に示す。ここで、(7)式を用いる。 $n_{11}=0$ 、 $n_{31}=0$ として、 $A_2(f)$ を前記 $FA(f)$ に多数回 (n_{21}) 乗じていく経緯の中で、鉄筋が直下にある $A_2^{n_{21}} \cdot FA(f)$ が中心周波数 $f_R=75.7\text{kHz}$ の $\text{Sin}^m(f)$ 状のスペクトルとして浮び上がる。図 9 がこの状況を示したものである。なお、図 8、図 9 に示す各線は、図 7 に示す計測点毎のスペクトルを表している。図 9 に示す測点 3、測点 8、測点 13 は鉄筋が存在する位置でのスペクトルである。図 10 は $f_R=75.7\text{kHz}$ とする $A_3^{n_{31}}(f)$ を用い、 $n_{31}=200$ として $A_3^{n_{31}}(f) \cdot A$

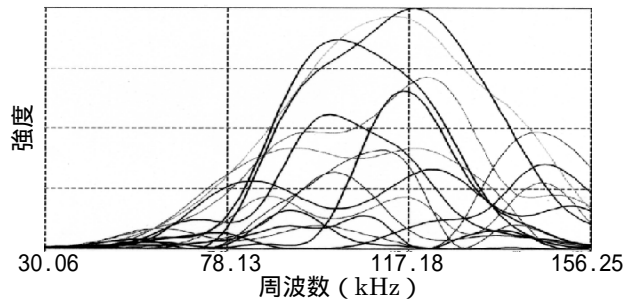


図 8 $GB(t)$ 波のスペクトル $FA(f)$

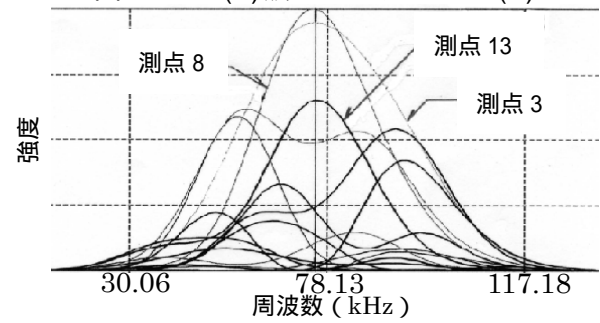


図 9 $GC(t)$ 波のスペクトル

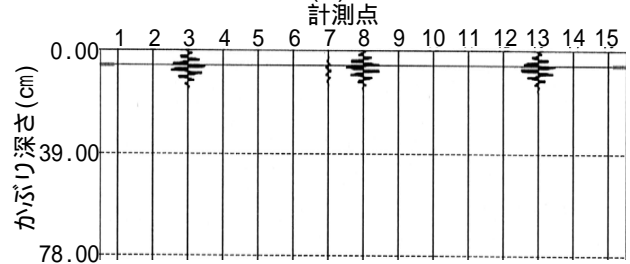


図 10 $GC^3(t)$ 波 (変更された鉄筋反射波)

$A_3^{n_{31}}(f) \cdot FA(f)$ より得た $GC^3(f)$ 表示波 (処理 (7)) である。直下に鉄筋が存在する測点 3、測点 8、測点 13 でのみ変更された鉄筋からの反射波が明敏に確認できる。探知目標波の強度が最も卓越する周波数 f_D は標準音速 (V_{st})、被探知体音速 (c_{VP})、探知路程 (ℓ) の関数 $\alpha_2(\ell)$ を用いて(8)式に示し定義する。

$$f_D = \alpha_2(\ell) \cdot \frac{c_{VP}}{V_{ST}} \quad (8)$$

つまり、最適周波数 $f_0^{(1)}$ あるいは第 2 の最適周波数 f_R のいずれかと、探知目標波が最も大きくなる振動数 f_D の平均の値により f_e を決定し (処理 (4))、この f_e を中心周波数とする狭帯域成分波を抽出すれば、変更された探知目標波をリアルタイムに特定できる。

3. リアルタイム計測を用いた埋設管探知 鉄筋コンクリート造建物の増改築や耐震改修

等を行う場合、壁やスラブからコンクリート強度試験用にコアを抜く必要が生ずる。壁やスラブには、鉄筋の他に設備管が埋設されており、これらを傷つけずにコアを抜き取るためには、埋設管の位置を正確に知る必要がある。文献3)では、埋設管の平面的位置及びかぶり厚を探知する計測手法を提案すると共に、埋設管の配置方向を確認し得る方法論についても論じた。しかし、以下の問題点を内包するものであった。

第1に、上記探知手法は電磁波等の探知装置を用いた探知に比べ高精度ではあるが測定作業と解析結果の検討にある程度時間を要すること、第2に、埋設管近傍での埋設管有無探知は短時間で高精度に特定し難いことが挙げられる。

そこで、上記問題点に対処し、容易かつ迅速に埋設管等を探知できる手法について論ずる。

3.1 埋設管探知用供試体概要

図11に埋設管探知用供試体概要を示す。壁やスラブを想定し、厚さ200mmのコンクリートの上下面に、D10の鉄筋をピッチ200mm、かぶり厚30mmと40mmで格子状に配筋し、更に、 $\phi 28.6$ の鉄管と $\phi 28$ の塩ビ管を埋設している。鉄筋直下の鉄管はかぶり厚85.7mm、斜めの鉄管はかぶり厚71.4mm、塩ビ管はかぶり厚100.0mmである。本実験では、ブロック番号1、2のブロックを使って行った。ブロック番号1は、埋設管が存在しないブロック、ブロック番号2は、埋設管が存在するブロックとする。供試体コンクリートの cV_p は4317.8m/secである。

3.2 埋設管有無探知結果

図12は図11のブロック1内のコンクリート面に探触子を固定配置して得た1000回の加算平均波 $G(t)$ を示す。また、図の横軸は時間(μ sec)を表し縦軸は強度(電圧)を表している。

図12中のカーソル(a)位置は版厚(200mm)に相当する反射波を示している。試計測により f_D 値を求める場合(処理(3))、(5)式の t_T 値(図12中のカーソル(a)位置に相当)で定義される図3の $FiLT t_T(t)$ を用いて図12の加算平均波に(6)式を用いて探知目標波を抽出する。

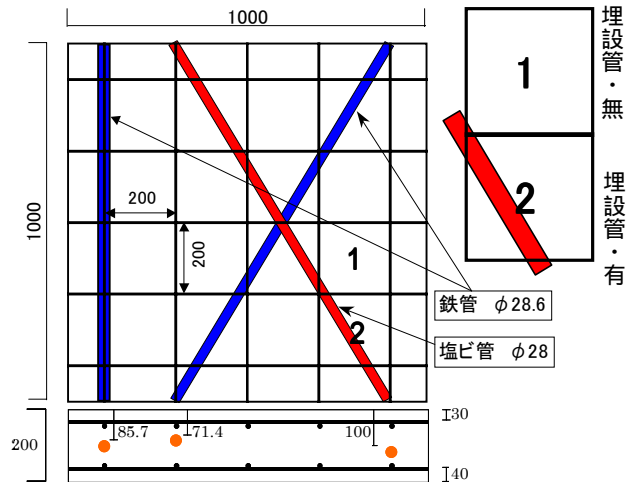


図11 供試体概要

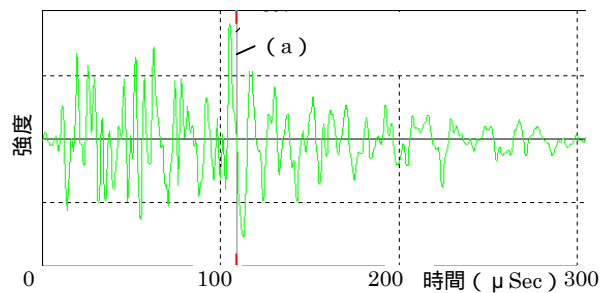


図12 加算平均(1000回)波形

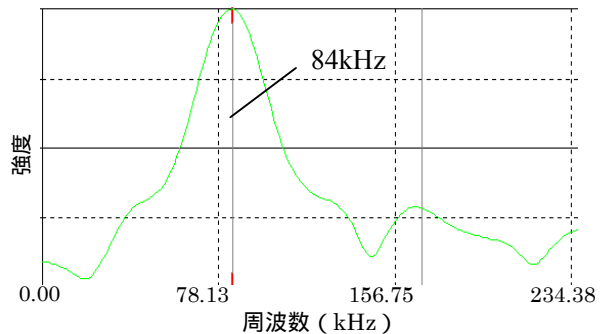


図13 スペクトル波形

図13が(6)式右辺の $FA(f)$ スペクトル(処理(6))で、同図カーソルで示す振動数84kHz(横軸:周波数)が探知目標を既知であるスラブ厚とした時の f_D 値(処理(3))である。この場合、表面波等の探知妨害波の強度が最小になる最適周波数は $f_R=107.5$ KHzとなる。上記 f_D 値と f_R 値(処理(2))では、若干その値が異なり $f_R > f_D$ となっている。埋設管からの反射波の f_D 値は、その路程が版厚反射波より短いことから上記 $f_D=84$ KHzより大きくなる。これより、リアルタイム波形として抽出する狭帯域成分波 $GB(t)$ (処理(6))の中心周波数を上記 f_R と f_D の平均値で $f_e = (107.5+84)/2 = 95$ KHzとする(処理(4))。

図 14 は、分析周波数の上限を 2500KHz とし、 $GB(t)$ 波を $GB^2(t)$ 表示したものである。図 12 の $G(t)$ 波では、版厚反射波の前後に生じていた妨害波が図 14 の $GB(t)$ 波では消滅し、版厚反射波のみが大きく生じているのを確認でき、埋設管なしとリアルタイムに判断できる。図 15, 16, 17 にブロック 2 についての探知結果を示す。図 15 中の (b) で示す波は版厚反射波であり、502 で示す波は図 16 の(A)に示す発信探触子の超音波発信面が直下の埋設管の平面投影面に探触子径の 1/4 が重なり、かつ受信探触子の中心と埋設管中心線との距離を 64 とした時の上記と同一の処理で抽出した $GB(t)$ 波を $GB^2(t)$ 表示したものである。(b) に示す版厚反射波以外に(c)に示す埋設管からの反射波が大きく生じている。同図 501 波は図 14 の埋設管が存在しない位置での版厚反射波を重ね描きしている。各波は、その最大振幅を最大表示している。次に、図 16 の(B)に示す探触子の双方共、埋設管の直上に配置した時の上記と同一の処理で抽出した $f_b = 95\text{KHz}$ を中心とする狭帯域成分波について確認する。図 17 中の (d) で示す波が、この場合の $GB^2(t)$ 波である。超音波の伝達が埋設管により遮断されることで、版厚反射波が消滅し、埋設管からの反射波が大きく生じている様が確認でき、埋設管有りとリアルタイムに確認できる。同点線線波は図 15 の場合と同様に図 14 の版厚反射波を重ね描きしている。なお、図 15, 図 17 の波形は、図に示す時系列フィルターを(6)式より作成している。

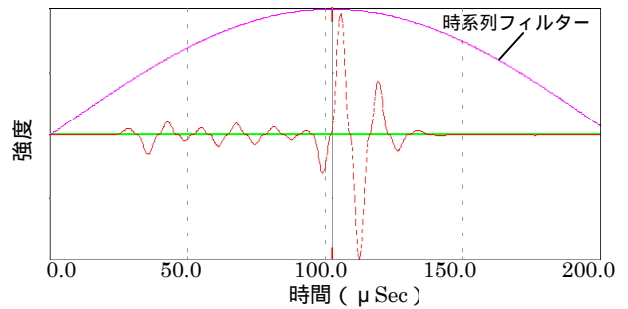


図 14 版厚反射波形

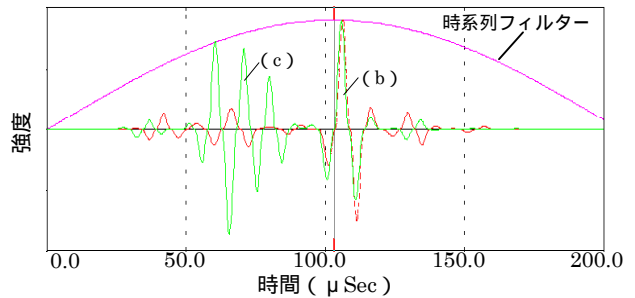


図 15 版厚・埋設管(探触子 1/4)反射波

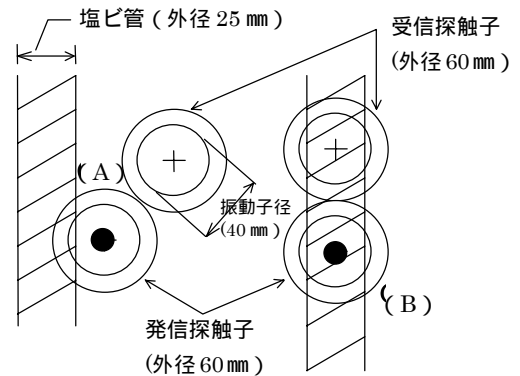


図 16 探触子位置

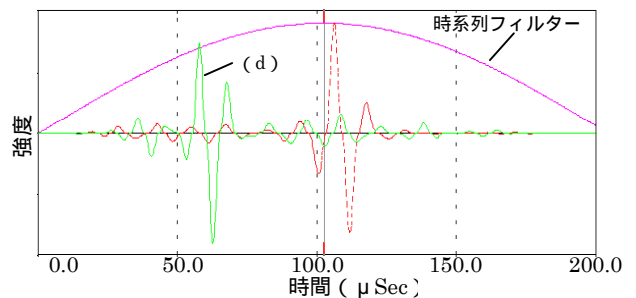


図 17 版厚・埋設管反射波形

4. まとめ

巨視的探知理論を拡張しコンクリート内部探知をリアルタイムに行うことが出来る計測法を確立し、リアルタイム計測を用いた埋設管探知・鉄筋探知の有効性を確認した。

参考文献

1) 廣瀬正行 他：超音波によるコンクリートの内部探知 2, 検査技術, 第 4 巻 6 号,

pp.50-56, 1999.6

2) 廣瀬正行 他：超音波によるコンクリートの内部探知 3, 検査技術, 第 4 巻 7 号, pp.47-56, 1999.7

3) 安達洋 他：超音波を用いたコンクリート系構造物の内部探知手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp571-576, 2001