

超音波を用いた杭長探査に関する研究

Research on the Pile Length Inquiry Using Ultrasonic Wave

鶴島守*, 川村洋平**, 伊藤優***, 氏平増之****, 水谷孝一*****, 倉岡千郎*****, 青島伸治*****
Mamoru Tsurushima, Youhei Kawamura, Yu Ito, Masuyuki Ujihira, Koichi Mizutani, Senro Kuraoka,
Nobuharu Aoshima

*非会員 筑波大学大学院修士課程 理工学研究科 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

**正会員 工博 筑波大学大学院講師 システム情報工学研究科
(〒305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

***非会員 筑波大学大学院博士前期教授 システム情報工学研究科
(〒305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

****正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科 (〒060-0813 北海道札幌市北区北 13 条西 8)

*****非会員 工博 筑波大学大学院教授 システム情報工学研究科
(〒305-0006 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

*****会員 工博 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

A supersonic method and an elastic impact wave method are mentioned to the typical thing of a non-destructive test method. However, by the supersonic method, since the input is small, it is said that the depth of the investigation becomes very shallow. Theoretically, if it becomes possible to input vibration of a supersonic domain into concrete with a high output directly, the investigation of the deep investigation depth and the high precision will be attained. In this research, it is aiming at building of the supersonic investigation system which input the vibration by the piezo-electric ceramics which gave it the voluntary waveform of the high voltage. In this paper, the result of foundation experiment by the AE transducer is shown.

Key Words: AE transducer, nondestructive test method, auto-correlation analysis, cepstrum analysis

キーワード: AE トランスデューサ, 非破壊検査, 自己相関分析, ケプストラム解析

1. はじめに

土木、建築現場において基礎杭の内部損傷度および根入れ深さを探査することは非常に重要である。現在、コンクリート等の人工構造物の損傷度探査あるいは寸法探査においては、経済性あるいは簡便性などの理由から非破壊検査法が用いられる。非破壊検査法の代表的なものには、超音波法と弾性波法が挙げられる。たとえばひび割れなどの微細な亀裂の探査には超音波法が用いられ、基礎杭等の根入れの深い構造物の場合には弾性波法が用いられている。しかし、超音波法では入力小さいことから探査深度が非常に浅くなると言われている。また弾性波法では、単杭の断面欠損など比較的大きな損傷

および杭長の探査に適している反面、微細な亀裂（亀裂幅 3～5mm 以下）の探査には反射波の解釈が難しい。加えてフーチングなどの介在物がある場合など構造物の形状が複雑となった場合、表面波と反射波が混在し杭長の判別ができなくなることもある。弾性波法では主にハンマーによる打撃を入力としているため、入力が大きく、また入力方法を変化させれば弾性波に周波数特性を持たせることができる。しかしながら、超音波法のように実験者の望む任意の周波数特性を入力に持たせることは難しい。また精度も超音波法に比べると低下してしまう。さらに、再現性の問題も残されている。理論的には、超音波領域の振動を直接に高出力でコンクリートに入力することが可能となれば、探査深度が深く精

度の高い探査が可能となる。そこで本研究では、高電圧の任意波形を与えた圧電セラミックによる加振を入力とした超音波探査システムの構築を目指している。それに先駆け、本論文では AE トランスデューサを用いた基礎実験を行った結果を示す。本論文では最初にコンクリートブロック内部の超音波伝達特性を調べた。その結果、40～60kHz の周波数帯域は伝達特性が良好であることがわかった。次に発波器、受波器ともに同型の AE トランスデューサを用い、長さ 900mm のコンクリートブロックの寸法推定を行った。解析は、受波用 AE トランスデューサが直接波と反射波を別々に受波した場合は自己相関分析を用い、直接波と反射波が混在した波形を受波した場合はケプストラム解析を用いた。結果、自己相関分析を用いたコンクリートブロックの推定寸法は 898.15mm となり、ケプストラム解析を用いた場合は、885.24mm となった。本研究は基礎実験の段階であるため、供試体は実規模よりは小さい長さ 900mm のコンクリートブロックを使用し、計測精度にこだわった。そのため入力電圧も抑えてしまい、超音波探査システムによる杭長探査の限界を今後の研究で明らかにする必要がある。

2. 測定原理

図-1 に杭の根入れ深さ探査の概念図を示す。まず、パターン 1 で示す様に送・受波用 AE トランスデューサを取り付け、杭内部を伝わる超音波伝播速度を調べる。次に、パターン 2 で示す様に AE トランスデューサを取り付けて、反射波が受波用 AE トランスデューサに到達するまでの時間を調べ、パターン 1 で得られた杭内部の超音波伝播速度とパターン 2 で得られた反射波の到達時間を式(1)に代入し、杭の根入れ深さ L を推定する。このとき、杭内部に亀裂がない場合は図-1(a)のように底部で反射して受波用 AE トランスデューサに到達するが、内部に亀裂が存在する場合は図-1(b)のように亀裂部分で反射して受波用 AE トランスデューサに到達する。この反射波到達時刻の違いを利用すると、杭の長さが既知である場合は、内部損傷度および亀裂の位置を推定することもできる。このとき、解析を簡単にするために、入力する信号には周波数特性を持たせる。

$$L = \sqrt{\left(\frac{V \times t}{2}\right)^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2} \quad (1)$$

ここで記号は、

V : 杭内部での超音波伝播速度

t : 反射波到達時刻

l : AE トランスデューサ間の距離

である。

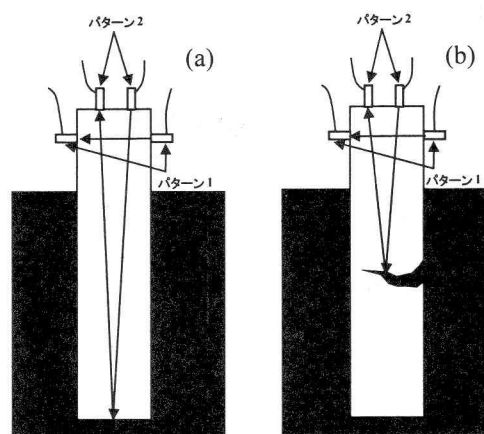


図-1 杭の根入れ深さ探査の概念図

3. AE トランスデューサ

AE トランスデューサの「AE」とは「Acoustic Emission」の略であり、直訳すると「音響の放出」で、その定義は、「材料が変形あるいは亀裂が発生する際に、材料に蓄えられていたひずみエネルギーを弾性波として放出する現象」である。トランスデューサ内の物理現象としては圧電効果を用いており、トランスデューサに電荷をかけると振動(変位)する。また、振動(応力)を与えると電荷が発生する。圧電効果には横効果、たて効果、せん断効果とある。AE トランスデューサは主にたて効果を利用している。本来、AE トランスデューサはセンサとして微小な弾性波を検知することに用いられるが、本システムでは超音波領域の弾性波を起振することにも用いる。本実験では送波用 AE トランスデューサ、受波用 AE トランスデューサともにエヌエフ回路設計ブロック社製の共振周波数約 140kHz 共振型 AE トランスデューサを用いた。図-2 に本実験に用いた AE トランスデューサの写真を、表-1 に諸元をそれぞれ示す。

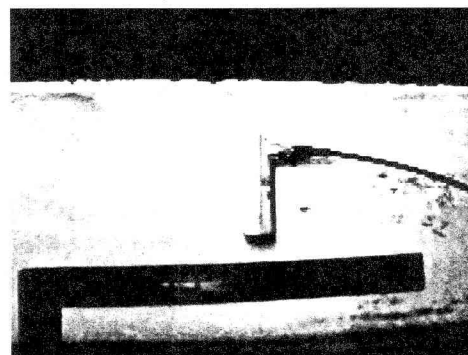


図-2 AE トランスデューサの写真

AE トランスデューサの圧電素子には圧電セラミックを用いている。圧電セラミックとは、水晶やロッシェル塩、チタン酸ジルコン酸鉛磁器(PZT)等の圧電効果を持ったセラミックであり、大きな駆動力を持つ。

表-1 AE センサの諸元

型名	AE-901	
共振周波数	140kHz	
形状	直径(mm)	12
	高さ(mm)	40
出力形式	不平衡(片線接地)	
タイプ	防油・防水仕様 に対応可能	

4. 実験方法

図-3 に超音波伝達特性試験の概念図を示す。図-4 は本実験で使用したコンクリートブロックの写真である。本実験で使用したコンクリートは無筋コンクリートであり、セメント、砂、砂利の割合は4:11:8である。用いた砂利は粒径20mmである。コンクリートの密度は3.15g/cm³である。超音波伝達特性試験ではファンクションジェネレータから40～400kHzまで2kHz刻みで正弦波の連続波を入力した。入力電圧は150V_{p-p}である。データのサンプリング速度は1MHzとして、一回の実験につき8msのデータを計測した。加速度センサ等の場合、周波数特性のフラットな所を使用するため、得られた出力はある特定の物理量に換算して表示することが可能であるが、AEトランスデューサの場合は、共振点を積極的に使用していることから、同じ電圧を印加した場合でも振幅(変位量)は異なるため、得られる出力も特定の物理量に換算することはできない。そこで、得られる電圧をそのまま表示することに加え、送波用AEトランスデューサと受波用AEトランスデューサを直接接続し、計測器全体としての周波数特性を調べたものを基準とした。以降、この電圧を V_0 とする。直接接続には万力型の鉄製治具を使用した。図-5にAEトランスデューサの直接接続状況の写真を示す。実験で得られる出力電圧を V_A として、相対強度表示には以下の式(2)を用いて、dB表示することとした。

$$\text{相対強度(dB)} = 20\log(V_A/V_0) \quad (2)$$

また、超音波伝達特性の指標としては、AE波形の V_{p-p} (最小値から最大値までの振幅)を用いている。図-6に反射波検出実験の概念図を示す。寸法探査の対象となったコンクリートブロックは縦150mm、横120mm、奥行き900mmである。本実験では最も幅がある奥行きの寸法探査のみを行った。また図-7は供試体にAEトランスデューサを取り付けた状態の写真である。

実験の流れは次の様になっている。送波器側ではPCで任意の電圧波形を作成して、ファンクシ

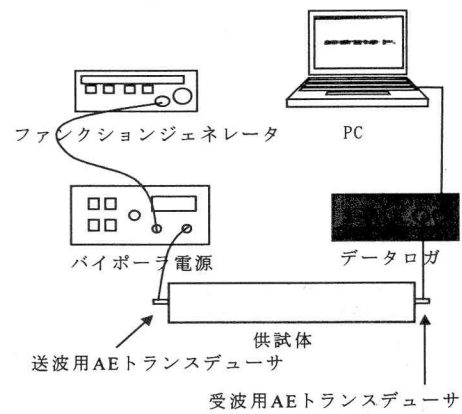


図-3 超音波伝達特性試験概念図

ンジェネレータに記憶させる。作成した電圧波形はそのままでは電圧が低いのでバイポーラ電源で増幅し、送波用AEトランスデューサに印加する。受波器側では、コンクリートブロック中を伝播してきた超音波を受波用AEトランスデューサが受波し電圧として出力する。出力電圧はサンプリング周波数1MHzでデータログに取り込み、PC上で波形解析を行った。

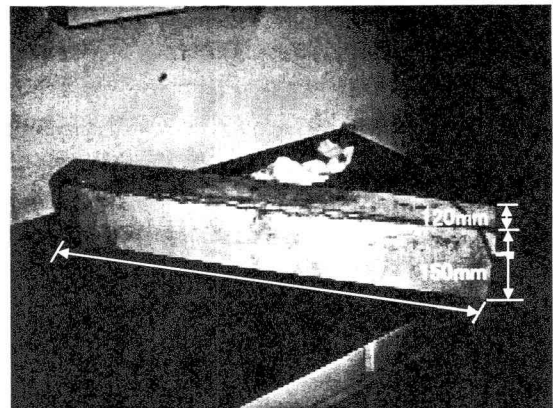


図-4 コンクリートブロックの寸法

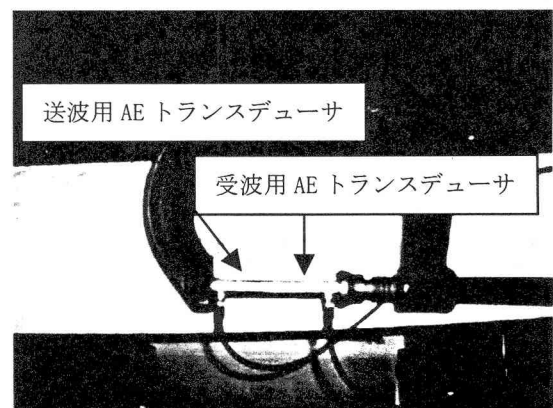


図-5 AEトランスデューサの直接接続状況の写真

最初に供試体の両側にAEトランスデューサを取り付け供試体内部の超音波伝播速度を測定した。

供試体内部を伝播する超音波速度は約 3688.52m/s であった。この結果から受波用 AE トランスデューサに反射波が到達する時間は約 0.488ms となることがわかった。その後、供試体の一方に送波器、受波器を取り付け反射波の検出を行った。送波器から入力する信号は周波数が 50～40kHz に変化するダ

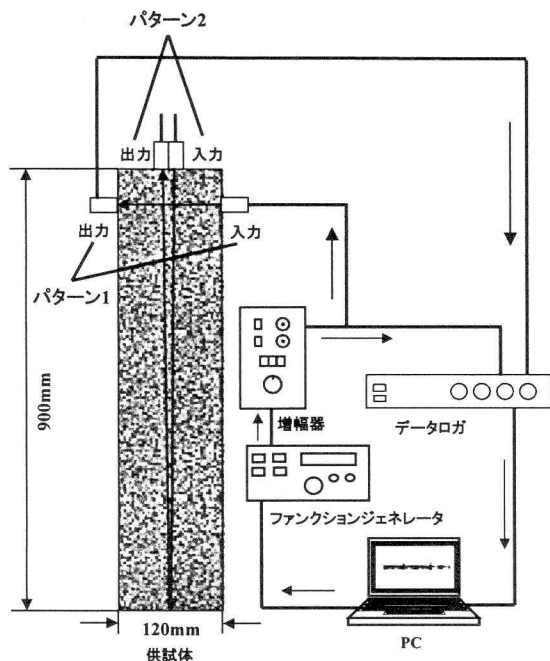


図-6 反射波検出実験概念図

ウンチャープ信号および 150～140kHz に変化するダウンチャープ信号を用いた。また、AE トランスデューサの取り付けにはエレクトロニックスを用いた。

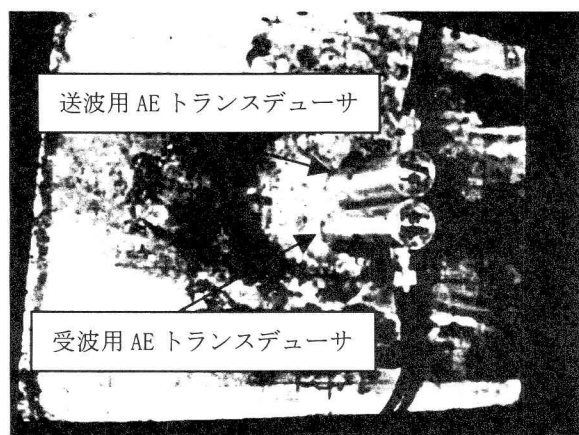


図-7 AE トランスデューサの取り付け状況

5. 実験結果

5.1 超音波伝達特性試験結果

図-8 に超音波伝達特性試験で受波用 AE トランスデューサから出力された最大電圧を示す。図-8 から周波数が 50kHz を越えたあたりから出力電圧が小さくなっていることがわかる。また図-9 に

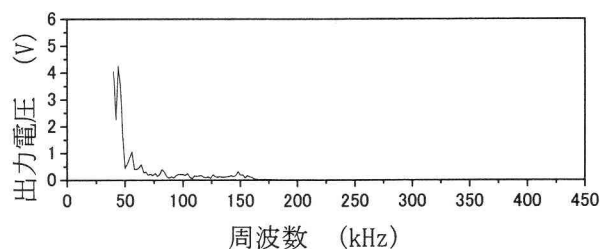


図-8 超音波伝達特性試験で周波数毎に得られた電圧

送・受波用 AE トランスデューサを直接接続したときに受波用 AE トランスデューサから出力された電圧を示す。図-9 から共振周波数で約 460 V の最大電圧が出力されていることがわかる。図-10 は式(2)に従い相対強度を示したものである。周波数による減衰の違いが無ければ、理想的にはこの相対強度は平坦な直線となる。図-10 から 40～60kHz の周波数伝達特性が良好なこと、約 60kHz を過ぎたあたりから相対強度が急激に小さくなっていること、約 200kHz 以降の高周波は伝達していないことがわかった。一見、相対強度が大きいことから、約 270kHz 以降の周波数伝達特性は良好のように見えるが、実際は、図-9 に示す直接接続の 270kHz 以降の値からわかるように、直接接続においても、出力はほとんど見られない状態である。また、図-8 においても出力はほとんどみられない。よって、相対的にはある程度大きい相対強度がみられているという結果になっている。このことから 40～60kHz では比較的 low 周波の帯域では周波数伝達特性が良好であることが確認された。

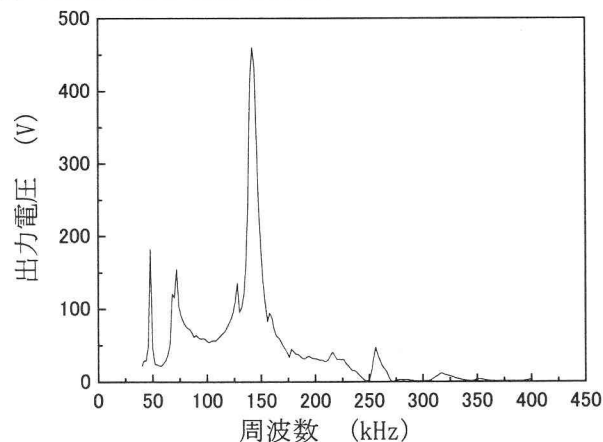


図-9 AE トランスデューサを直接接続し周波数毎に得られた電圧

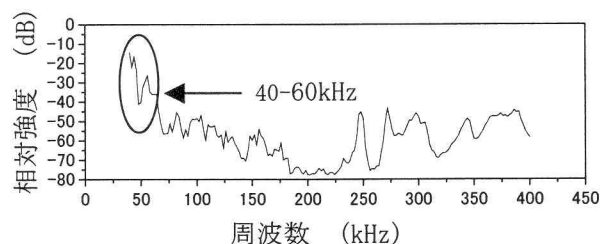


図-10 相対強度

5.2 反射波検出実験結果

図-11(a)に送波用 AE トランスデューサに印加した 50~40kHz のダウンチャープ信号, 図-11(b)に受波用 AE トランスデューサから出力された電圧波形をそれぞれ示す. また, 図-12(a)に図-11(a)を FFT した結果を, 図-12(b)に図-11(a)を FFT した結果をそれぞれ示す. 図-13(a)に送波用 AE トランスデューサに印加した 150~140kHz のダウンチャープ信号, 図-13(b)に受波用 AE トランスデューサから出力された電圧波形をそれぞれ示す. また, 図-14(a)に図-13(a)を FFT した結果を, 図-14(b)に図-13(a)を FFT した結果をそれぞれ示す.

図-11(b)を見ると直接波と反射波が別々に受波されていることがわかる. このように理想的な出力波形を得た場合は自己相関分析を用いて反射波の到達時刻の推定を試みた.

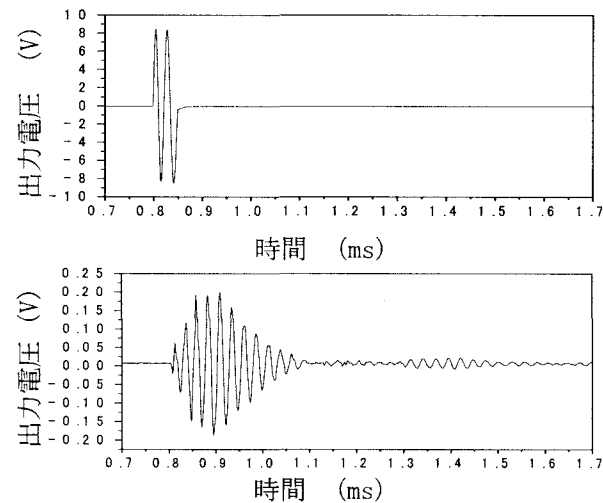


図-11 入出力電圧波形例(50~40kHz)

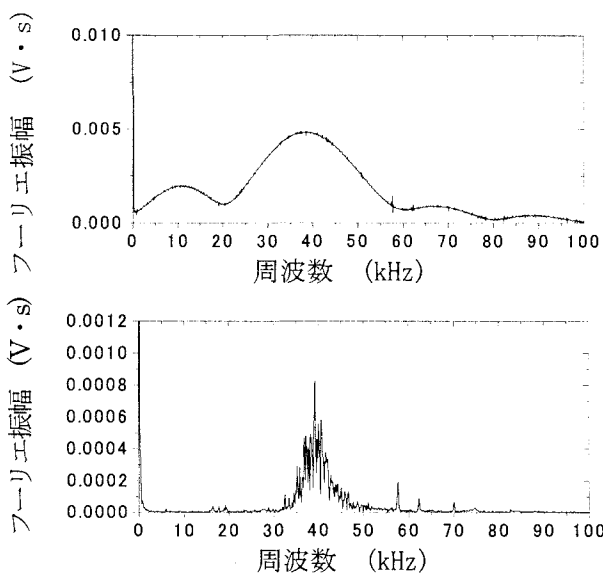


図-12 FFT 結果(50~40kHz)

また図-13(b)を見ると, こちらは直接波と反射波が混在しており, このような波形では自己相関分析での反射波到達時刻の推定は行えない. そこで, いくつかの信号が畳み込みの形で結合して出来ている信号に対して, 結合している信号を分離させ, それぞれの信号の特性解析を可能にする信号処理技術の一つであるケプストラム解析を用いて反射波到達時刻の推定を試みた.

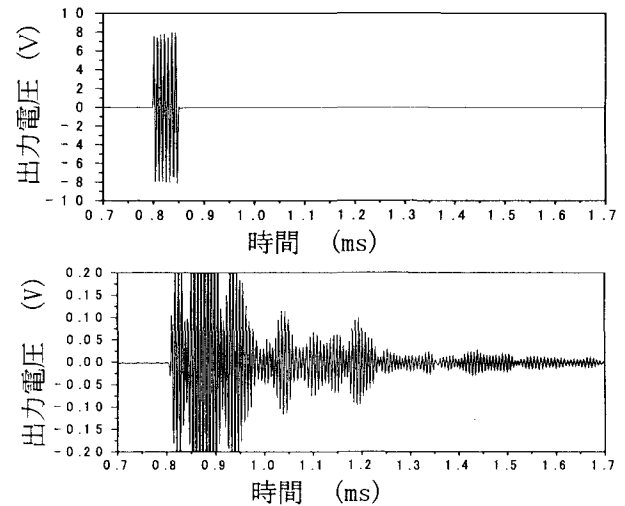


図-13 入出力電圧波形例(150~140kHz)

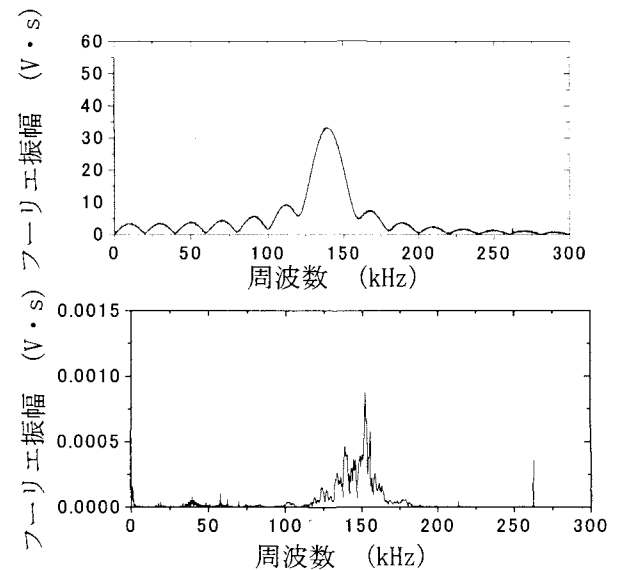


図-14 FFT 結果(150~140kHz)

6. 解析結果

6.1 自己相関分析

自己相関分析は波形内データの類似性を調べるときに用いられる解析方法である. 反射波を検出する実験では受波用 AE トランスデューサから出力される波形は直接波と反射波である. 本実験では, 入力信号に周波数特性を持たせてあるので受波用 AE トランスデューサが受波する直接波と反射波の相関が高い. そこで自己相関分析を用いて反射波が AE トランスデューサに到達する時間が求められる

かを調べた。自己相関の共分散係数 R_j の計算では便宜上振幅の絶対値を用いる。 R_j は式(3)で示される。得られた共分散係数 R_j を縦軸、時間ずれをあらわす j を横軸にとり自己共分散係数図を作成する。

$$R_j = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} |x_i| |x_{i+j}| \quad (3)$$

ここで記号は、

N : 処理データ数

x_i : i 番目の振幅

x_{i+j} : 時間ずれ $j\Delta t$ における振幅である。

時間ずれ j が 0 のとき自己共分散係数は最大値 (ピーク) を示しており、2 番目に現れるピークのデータ番号が反射波の到達時間のデータ番号となる。反射波到達時間 t は式(4)で求める。

$$t = j \times \Delta t + t_0 \quad (4)$$

ここで記号は、

j : 2 番目に現れるピークのデータ番号

Δt : データログのサンプリングタイム

t_0 : 弾性波が入力されてから受波用 AE トランスデューサが直接波を検出するまでの時間である。

本実験では送・受波用 AE トランスデューサ間の距離は $l=0$ とみなせる。また $l=0$ より $t_0=0$ とみなせる。

6.2 自己相関分析結果

図-15 に図-11(b) の自己相関分析結果を示す。図-15 を見ると 2 番目のピークは 0.487ms に現れていることがわかった。したがって、自己相関分析から得られた反射波到達時刻 $t=0.487\text{ms}$ と $V=3688.52\text{m/s}$ を式(1)に代入し、コンクリートブロックの寸法を推定したところ $L=898.15\text{mm}$ となり誤差は 1% 以内となった。

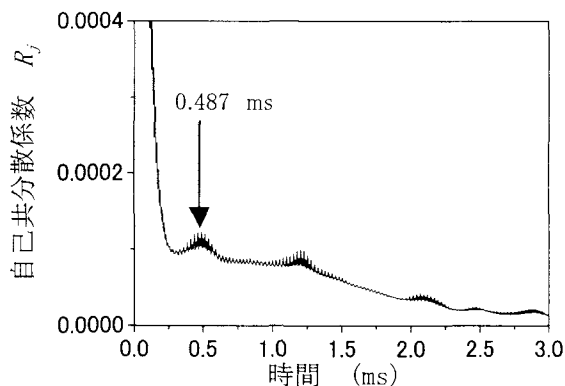


図-15 自己相関分析結果

6.3 ケプストラム解析

ケプストラム解析とは、いくつかの信号が畳み込みの形で結合して出来ている信号に対して、結合している信号

を分離させ、それぞれの信号の特性解析を可能にする信号処理技術の一つである。

本実験では、直接波と反射波が混在してしまい自己相関分析を用いることの出来ない波形から直接波と反射波の分離を試みた。また、将来的にはケプストラム解析を用いることで、内部に微細な亀裂が多数存在するようなコンクリートブロックの杭長探索を行う場合でも、その亀裂一つ一つから受波用 AE トランスデューサに到達する反射波を分離し、亀裂の数、亀裂までの距離を調べることが可能であると考えられる。送波用 AE トランスデューサと受波用 AE トランスデューサが図-16 のようにコンクリートブロックに設置されているとき、送波用 AE トランスデューサから受波用 AE トランスデューサに送波された直接波は $f(t)$ となる。反射係数が周波数に関係ない場合、 $f(t)$ の減衰率は r と表され、 $f(t)$ のタイムラグは T と表される。このことから、反射波は $r \cdot f(t-T)$ と表される。また、受波用 AE トランスデューサが多数の反射波を受波した場合、この系は式 $g(t) = \delta(t) + r \cdot \delta(t-T)$ で表されるインパルス応答系と考えられる。

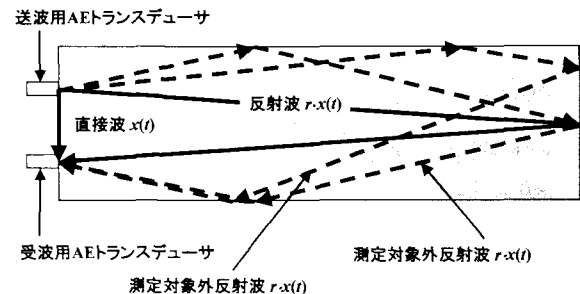


図-16 供試体内部の超音波伝達経路

図-17 はケプストラム解析のフローチャートを示している。

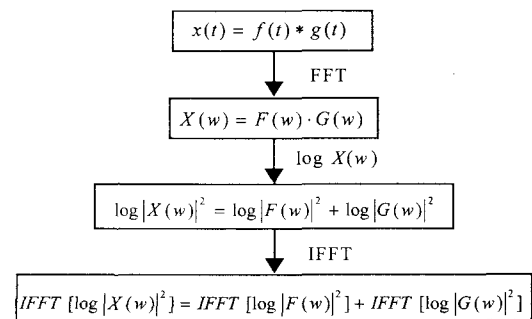


図-17 ケプストラム解析のフローチャート図

変数 $x(t)$ は信号 $f(t)$ がこの系に入力されたときの出力とみなされる。それゆえ、畳み込みの式は図-17 最上段の式で表される。ケプストラム解析では、最初に FFT を用いて時間領域の信号から周波数領域の信号に変換する。すると、畳み込みの式は図-17 の二段目で示すように乗算の形で表される。このとき $x(t), f(t), g(t)$ は $X(\omega), F(\omega), G(\omega)$ と表される。次に、2 つの変数に分けるために周波数スペクトルの対数をとる。最後に IFFT を用いてスペクト

ル図全体にわたって見られる一定のリップルの周波数成分を抽出する。この結果の次元は時間領域を表しているが、元の時間領域と区別するためケフレンシ領域と呼ばれている。

6.4 反射波検出

直接波に反射波が含まれていると、パワースペクトルに周期的なリップルが現れる。今回は簡単のために単一の反射波を含む式(5)で考える。

$$x(t) = f(t) + r \cdot f(t-T) \quad (5)$$

次に式(5)のパワーケプストラムをとると式(6)と表される。

$$\begin{aligned} |X(j\omega)|^2 &= |F(j\omega)|^2 |1 + r \cdot e^{-jT\omega}|^2 \\ &= |F(j\omega)|^2 (1 + r^2 + 2r \cdot \cos T\omega) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、式(6)余弦波状の周期的なリップルが確認できる。式(7)は式(6)の対数をとったものを示している。

$$\begin{aligned} \log|X(j\omega)|^2 &= \log|F(j\omega)|^2 + \log(1 + r^2) \\ &\quad + \log\left(1 + \frac{2r}{1 + r^2} \cos T\omega\right) \end{aligned} \quad (7)$$

このとき、式(7)の右辺第3項は $r = \pm 1$ もしくは $\cos n_0 \omega = \pm 1$ の場合を除くと式(8)と表される。

余弦波状のリップルが非線形な対数変換によって式(7)に示されるように、無限の高調波成分まで含むものに変換されるが、そのIFFTを考えるとケフレンシが T の整数倍のところに鋭いピークが得られる。一方、直接波 $f(t)$ が不規則な信号であれば、そのパワースペクトルが特別な周期性を示すことはないから、ケプストラム上の鋭いピーク値からエコーの存在とその遅れ時間 T および減衰率 r を推定することができる。

$$\begin{aligned} \log(1 + r_0 \cos T\omega) &= \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m+1}}{m} (r_0 \cos T\omega)^m \\ r_0 &= \frac{2r}{1 + r^2} \end{aligned} \quad (8)$$

6.5 ケプストラム解析結果

このシステムから得られた出力波形にケプストラム解析を適用した結果を示す。図-18 は図-14(b)の対数をとったものである。図-18を見ると周期的なリップルが現れていることが確認できる。これは反射波が直接波と混在しているためである。次に図-19にIFFTを用いて周期的なリップルの周波数スペクトル成分を抽出した結果を示す。図-19から反射波到達時刻は0.48msとなった。したがって、ケプストラム解析から求めた反射波到達時刻 $t=0.48\text{ms}$ と $L=3688.52\text{mm}$ を式(1)に代入しコンクリ

ートブロックの推定寸法を求めたところ $L=885.24\text{mm}$ となり誤差は2%以内となった。

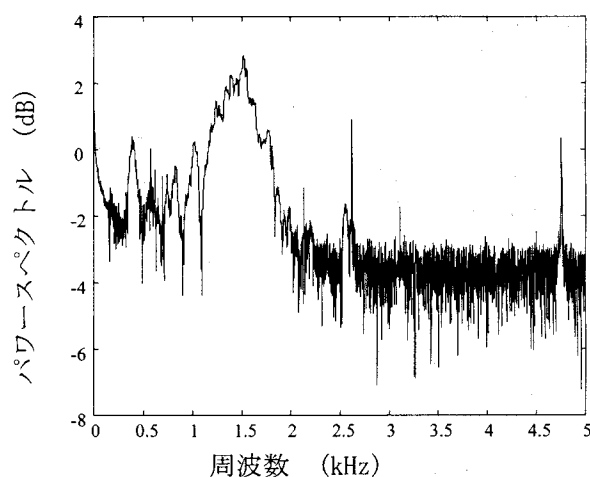


図-18 図-14(b)のパワースペクトル

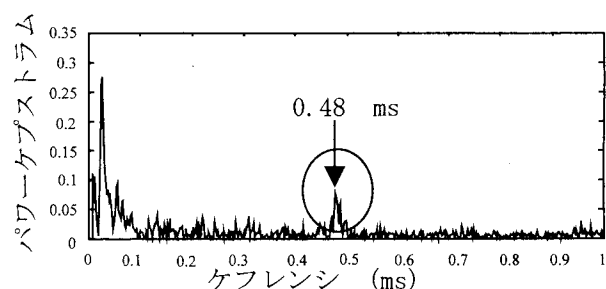


図-19 ケプストラム解析結果

7. まとめ

本研究では、超音波の送受波にAEトランスデューサを用いて杭に見立てた幅900mmのコンクリートブロックで反射波検出の基礎実験を行い、得られたデータからコンクリートブロックの寸法が推定できるが調べた。本研究により得られた知見を以下に示す。

1. 幅900mmのコンクリートブロックでは40～60kHzの周波数伝達特性が良好なことで、約200kHz以降の高周波は伝達していないことがわかった
2. 受波用AEトランスデューサが直接波と反射波を別々に受波した場合、自己相関分析を用いて反射波到達時刻を決定することができた。
3. 自己相関分析から求めた反射波到達時刻を基にコンクリートブロックの寸法を推定したところ $L = 898.15\text{mm}$ となり誤差は1%以内となった。
4. 受波用AEトランスデューサが直接波と反射波が混在した波形を受波した場合、ケプストラム解析を用いて反射波到達時刻を決定することができた。
5. ケプストラム解析から求めた反射波到達時刻

を基にコンクリートブロックの寸法を推定したところ $L = 885.24\text{mm}$ となり誤差は2%以内となった。

参考文献

- 1) 森下巖, 小畑秀文: 信号処理, コロナ社, 1982
- 2) Y. Kawamura, M. Tsurushima, N. Aoshima, K. Mizutani: Fundamental study on ultrasonic measurement system to detect penetration of boulders using auto-correlation analysis, The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, CD-ROM, 2004
- 3) Y. Kawamura, M. Tsurushima, K. Mizutani, M. Ujihira, N. Aoshima, S. Kuraoka: Ultrasonic Measurement System for Detecting Penetration of Boulders by Autocorrelation Analysis, Jpn. J. Appl. Phys, Vol.44, No.6B, pp4364-4369, 2005
- 4) 池原雅章, 島原徹也, 真田幸俊: MATLAB マルチメディア信号処理(下), 培風館, 2004
- 5) 今井聖: 音声信号処理, 森北出版, 1996
- 6) 川村洋平, 鶴島守, 氏平増之, 水谷孝一, 倉岡千郎: 超音波直接加振による転石の根入れ深さ探査に関する基礎実験, 資源素材学会秋季講演集, pp283-284, 2004
- 7) 川村洋平, 鶴島守, 水谷孝一, 伊藤優, 氏平増之, 青島伸治: 超音波を用いた転石根入れ深さの探査における反射波検出手法, 資源素材学会春季大会講演集, pp. 89-90, 2005
- 8) 塩月隆久, 孫建生, 古川浩平: 高周波衝撃弾性波法による転石根入れ長さ探査, 土木学会論文集, No. 680 pp141-153, 2001
- 9) K. Kudo, K. Mizutani: Temperature Measurement Using Acoustic Reflectors, Jpn. J. Appl. Phys, No. 43, pp3095-3098, 2004
- 10) K. Mizutani, K. Taruishi, Y. Hachisuka, K. Kudo, M. Ishii: Micrometeorology Measurement by Acoustic Method, Jpn. J. Appl. Phys, pp3099-3102, 2004
- 11) 川村洋平, 鶴島守, 水谷孝一, 倉岡千郎, 青島伸治: AE トランスデューサを用いた超音波直接加振による転石の根入れ深さ探査に関する基礎実験, 音響学会講演集 pp1271-1272, 2004

(2005年4月15日受付)