

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5814582号
(P5814582)

(45) 発行日 平成27年11月17日(2015.11.17)

(24) 登録日 平成27年10月2日(2015.10.2)

(51) Int.Cl.		F I
GO 1 N 29/12	(2006.01)	GO 1 N 29/12
GO 1 N 29/38	(2006.01)	GO 1 N 29/38
GO 1 N 29/46	(2006.01)	GO 1 N 29/46

請求項の数 8 (全 73 頁)

(21) 出願番号	特願2011-79915 (P2011-79915)	(73) 特許権者	506258305 有限会社エッチアンドピーソリューション 東京都新宿区西新宿3丁目17番7号 T OKビル9F
(22) 出願日	平成23年3月31日(2011.3.31)	(73) 特許権者	595059377 株式会社日本ピーエス 福井県敦賀市若泉町3番地
(65) 公開番号	特開2011-227072 (P2011-227072A)	(73) 特許権者	000173784 公益財団法人鉄道総合技術研究所 東京都国分寺市光町二丁目8番地38
(43) 公開日	平成23年11月10日(2011.11.10)	(73) 特許権者	000196587 西日本旅客鉄道株式会社 大阪府大阪市北区芝田2丁目4番24号
審査請求日	平成25年8月22日(2013.8.22)	(74) 代理人	100067747 弁理士 永田 良昭
(31) 優先権主張番号	特願2010-83669 (P2010-83669)		
(32) 優先日	平成22年3月31日(2010.3.31)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 反射波又は自励振動波卓越振動数を利用した超音波探査装置及び超音波探査方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを1対の探触子として備えた超音波探査装置であって、

計測対象シースの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シースの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記1対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シースに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$; $n_w - 1$ は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j = n_w}(t)$ として、シース充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求め、 $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描き表示する分析用画面と、

$G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対して第1の分析手段と第2の分析手段による分析を繰り返し、未充填又は充填不足シース反射波の卓越振動数 f_k 又は充填シース反射波の卓越振動数 f_s を特定するシース内充填有無分析手段とを備え、

第1の分析手段を、

所定値 $f \sim_k$ (なお、 $f \sim$ は数式において f の上に“ \sim ”を付された符号を表す。以下同じ。) を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f \sim_k$ で 1.0 、 $f = 2f \sim_k$ で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と1以上の整数 n_1 を用いて $FA_j(f) = A^{n_1}(f) \cdot F_j(f)$ により $FA_j(f)$ を求め、 $FA_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 $GA_j(t)$ を求

める分析手段とし、

第2の分析手段を、

シーساتて波反射波又はシーساتて波反射波とモード変換波との混合波をシーساتて波反射波の起生時刻 t_h と所定の t_a 値で定義される $TGC(t)$ 関数を用いて、前記 $GA_j(t)$ 波より $GB_j(t)$ を $GB_j(t) = TGC(t) \cdot GA_j(t)$ により切り出し、対応するスペクトル $FB_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、

前記シース内充填有無分析手段を、

前記第1の分析手段と第2の分析手段の繰り返しを、前記 f_k の初期値を 30kHz 、 $f_k = 1.0$ 又は 2.0kHz として $f_k = f_k + f_k$ の計算の都度、前記第1の分析手段、第2の分析手段で前記 $FB_j(f)$ を求め、 n を1以上の整数として、 $FB_j(f)$ 又は $FB_j^n(f)$ を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を f_k が 60kHz になるまで繰り返し行うこととし、 $FB_{j=nw}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、 $38\text{kHz} \sim 65\text{kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k 、 $15\text{kHz} \sim 30\text{kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s として特定する構成とし、

前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定されるコンクリート端面からの反射波 (P_2 波) の起生時刻の $10\mu\text{s}$ 後と前記シーساتて波反射波の起生時刻 t_h との差で特定し、

前記 $TGC(t)$ 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h + t_a / 2$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、

前記最大エントロピー法スペクトル表示の $FB_{j=nw}(f)$ スペクトルの変化の推移で前記 f_k 又は f_s が特定できた f_k 値に対応する $FB_{j=nw}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シース内部に充填材が完全充填されたシースと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シース内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シースと判断するシース充填有無判断手段を備えた

超音波探査装置。

コンクリート端面からの反射波 (P_2 波) の起生時刻：

$$t[P_2] = 2 \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b_1^2} / V_p$$

シーساتて波反射波の起生時刻 t_h ：

$$t_h[ds|P] = 2 \sqrt{\left(\frac{a-\phi}{2}\right)^2 + ds^2} / V_p$$

ここで、 a は発信探触子と受信探触子の間隔、 ds は計測対象シースの埋め込み深さ (シース表面)、 b_1 は計測位置からコンクリート端面までの距離、 V_p は計測対象コンクリートのたて波 (P 波) 音速、 ϕ は探触子径である。

【請求項2】

超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを1対の探触子として備

10

20

30

40

50

えた超音波探査装置であって、

計測対象シースの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シースの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記 1 対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シースに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$; $n_w - 1$ は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j = n_w}(t)$ として、シース充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求め、 $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描き表示する分析用画面と、

$G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対して第 1 の分析手段と第 2 の分析手段による分析を行い、未充填又は充填不足シース反射波の卓越振動数 f_k 又は充填シース反射波の卓越振動数 f_s を特定するシース内充填有無分析手段とを備え、

第 1 の分析手段を、

シースたて波反射波又はシースのたて波反射波とモード変換波との混合波をシースたて波反射波の起生時刻 t_h と所定の t_a 値で定義される $TGC(t)$ 関数を用いて、前記 $G_j(t)$ 波より $GA_j(t)$ を $GA_j(t) = TGC(t) \cdot G_j(t)$ により切り出し、対応するスペクトル $FA_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、

第 2 の分析手段を、

所定値 $f \sim_k$ (なお、 $f \sim$ は数式において f の上に “ \sim ” を付された符号を表す。以下同じ。) を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f \sim_k$ で 1.0 、 $f = 2f \sim_k$ で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と 1 以上の整数 n_1 を用いて $FB_j(f) = A^{n_1}(f) \cdot FA_j(f)$ により $FB_j(f)$ を求め、 $FB_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 $GB_j(t)$ を求める分析を前記 $f \sim_k$ の初期値を 30 kHz 、 $f \sim_k = 1.0$ 又は 2.0 kHz として $f \sim_k = f \sim_k + f \sim_k$ の計算の繰り返しの都度 $FB_j(f)$ を求め、 n を 1 以上の整数として、 $FB_j(f)$ 又は $FB_j^n(f)$ を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を $f \sim_k$ が 60 kHz になるまで繰り返し行い、 $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、 $38 \text{ kHz} \sim 65 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k 、 $15 \text{ kHz} \sim 30 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s として特定する手段とし、

前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定されるコンクリート端面からの反射波 (P_2 波) の起生時刻の 10μ 秒後と前記シースたて波反射波の起生時刻 t_h との差で特定し、

前記 $TGC(t)$ 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h + t_a / 2$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、

前記最大エントロピー法スペクトル表示の $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前記 f_k 又は f_s が特定できた $f \sim_k$ 値に対応する $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シース内部に充填材が完全充填されたシースと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シース内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シースと判断するシース充填有無判断手段を備えた超音波探査装置。

コンクリート端面からの反射波 (P_2 波) の起生時刻：

10

20

30

40

$$t[P_2] = 2 \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b_1^2} / V_p$$

シースタて波反射波の起生時刻 t_h :

$$t_h[ds|P] = 2 \sqrt{\left(\frac{a-\phi}{2}\right)^2 + ds^2} / V_p$$

10

ここで、 a は発信探触子と受信探触子の間隔、 ds は計測対象シースの埋め込み深さ（シース表面）、 b_1 は計測位置からコンクリート端面までの距離、 V_p は計測対象コンクリートのたて波（P波）音速、 ϕ は探触子径である。

【請求項3】

超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを1対の探触子として備えた超音波探査装置であって、

計測対象シースの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シースの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記1対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シースに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$; $n_w - 1$ は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j = n_w}(t)$ として、シース充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求め、 $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描き表示する分析用画面と、

20

$G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対して第1の分析手段と第2の分析手段による分析を繰り返し、未充填又は充填不足シース反射波の卓越振動数 f_k 又は充填シース反射波の卓越振動数 f_s を特定するシース内充填有無分析手段とを備え、

30

第1の分析手段を、

所定値 $f \sim_k$ (なお、 $f \sim$ は数式において f の上に“ \sim ”を付された符号を表す。以下同じ。) を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f \sim_k$ で 1.0 、 $f = 2f \sim_k$ で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と1以上の整数 n_1 を用いて $F A_j(f) = A^{n_1}(f) \cdot F_j(f)$ により $F A_j(f)$ を求め、 $F A_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 $G A_j(t)$ を求める分析手段とし、

第2の分析手段を、

シース自励振動でシース廻りコンクリートをシース長手方向に伝達するシース自励P波又はシース自励P波とS波の混合波を分析対象波とし、 t_h をシース自励P波の起生時刻とし、この t_h と所定の t_a 値で定義される $TGC(t)$ 関数を用いて、前記時系列 $G A_j(t)$ 波より $G B_j(t)$ を $G B_j(t) = TGC(t) \cdot G A_j(t)$ により切り出し、対応するスペクトル $F B_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、

40

前記シース内充填有無分析手段を、

前記第1の分析手段と第2の分析手段の繰り返しを、前記 $f \sim_k$ の初期値を 30 kHz 、 $f \sim_k = 1.0$ 又は 2.0 kHz として $f \sim_k = f \sim_k + f \sim_k$ の計算の都度、前記第1の分析手段、第2の分析手段で前記 $F B_j(f)$ を求め、 n を1以上の整数として、 $F B_j(f)$ 又は $F B_j^n(f)$ を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を $f \sim_k$ が 60 kHz になるまで繰り返し行うこととし、 $F B_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、 $38 \text{ kHz} \sim 65 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数を

50

シー反射波の卓越振動数 f_k 、15 kHz ~ 30 kHz 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシー反射波の卓越振動数 f_s として特定する構成とし、

前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定される版厚反射 (dw | M_1 波) の起生時刻と前記シー自励 P 波 (ds | 自 P) の起生時刻 t_h との差で特定し、

前記 TGC (t) 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0、 $t = t_h + t_a / 2$ で 1.0、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、

前記最大エントロピー法スペクトル表示の $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前記 f_k 又は f_s が特定できた f_k 値に対応する $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シー内部に充填材が完全充填されたシーと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シー内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シーと判断するシー充填有無判断手段を備えた

超音波探査装置。

版厚反射の起生時刻：

$$t[dw|M_1] \approx \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / V_p + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / 0.6V_p$$

シー自励 P 波の起生時刻：

$$t_h[ds|自P] = (a + 2ds) / \beta \cdot V_p$$

ここで、 a は発信探触子と受信探触子の間隔、 dw はコンクリート版厚、 ds はシー純かぶり厚、 V_p は計測対象コンクリートのたて波 (P 波) 音速、 β は探触子径、 β はシー自励 P 波 (ds | 自 P) の起生時刻算定用補正係数である。

【請求項 4】

超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを 1 対の探触子として備えた超音波探査装置であって、

計測対象シーの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シーの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記 1 対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シーに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$; $n_w - 1$ は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j = n_w}(t)$ として、シー充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求め、 $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描き表示する分析用画面と、

$G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対して第 1 の分析手段と第 2 の分析手段による分析を行い、未充填又は充填不足シー反射波の卓越振動数 f_k 又は充填シー反射波の卓越振動数 f_s を特定するシー内充填有無分析手段とを備え、

第 1 の分析手段を、

シー自励振動でシー廻りコンクリートをシー長手方向に伝達するシー自励 P 波又はシー自励 P 波と S 波の混合波を分析対象波とし、 t_h をシー自励 P 波の起生時刻とし、この t_h と所定の t_a 値で定義される TGC (t) 関数を用いて、前記時系列 $G_j(t)$ 波より $GA_j(t)$ を $GA_j(t) = TGC(t) \cdot G_j(t)$ により切り出し、対応するス

ベクトル $F A_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、
第2の分析手段を、

所定値 $f \sim_k$ (なお、 $f \sim$ は数式において f の上に “ \sim ” を付された符号を表す。以下同じ。) を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f \sim_k$ で 1.0 、 $f = 2 f \sim_k$ で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と 1 以上の整数 n を用いて $F B_j(f) = A^{n-1}(f) \cdot F A_j(f)$ により $F B_j(f)$ を求め、 $F B_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 $G B_j(t)$ を求める分析を前記 $f \sim_k$ の初期値を 30 kHz 、 $f \sim_k = 1.0$ 又は 2.0 kHz として $f \sim_k = f \sim_k + f \sim_k$ の計算の繰り返しの都度 $F B_j(f)$ を求め、 n を 1 以上の整数として、 $F B_j(f)$ 又は $F B_j^n(f)$ を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を $f \sim_k$ が 60 kHz になるまで繰り返し行い、 $F B_{j=n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、 $38 \text{ kHz} \sim 65 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k 、 $15 \text{ kHz} \sim 30 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s として特定する構成とし、
前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定される版厚反射 ($d w | M_1$ 波) の起生時刻と前記シース自励 P 波 ($d s | 自 P$) の起生時刻 t_h との差で特定し、

前記 $T G C(t)$ 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h + t_a / 2$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、

前記最大エントロピー法スペクトル表示の $F B_{j=n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前記 f_k 又は f_s が特定できた $f \sim_k$ 値に対応する $F B_{j=n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シース内部に充填材が完全充填されたシースと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シース内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シースと判断するシース充填有無判断手段を備えた

超音波探査装置。

版厚反射の起生時刻：

$$t[dw|M_1] \approx \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / V_p + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / 0.6V_p$$

シース自励 P 波の起生時刻：

$$t_h[ds|自P] = (a + 2ds) / \beta \cdot V_p$$

ここで、 a は発信探触子と受信探触子の間隔、 dw はコンクリート版厚、 ds はシース純かぶり厚、 V_p は計測対象コンクリートのたて波 (P 波) 音速、 β は探触子径、 β はシース自励 P 波 ($ds | 自 P$) の起生時刻算定用補正係数である。

【請求項 5】

超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを 1 対の探触子として備えた超音波探査装置を用いた超音波探査方法であって、

計測対象シースの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シースの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記 1 対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シースに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子

10

20

30

40

50

で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$; $n_w - 1$ は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j = n_w}(t)$ として、シース充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求め、分析用画面に $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描きする表示ステップと、 $G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対してシース内充填有無分析手段を適用し、第1の分析手段と第2の分析手段による分析を繰り返し、未充填又は充填不足シース反射波の卓越振動数 f_k 又は充填シース反射波の卓越振動数 f_s を特定するシース内充填有無分析ステップとを有し、

第1の分析手段を、

所定値 $f \sim_k$ (なお、 $f \sim$ は数式において f の上に “ \sim ” を付された符号を表す。以下同じ。) を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f \sim_k$ で 1.0 、 $f = 2f \sim_k$ で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と1以上の整数 n_1 を用いて $FA_j(f) = A^{n_1}(f) \cdot F_j(f)$ により $FA_j(f)$ を求め、 $FA_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 $GA_j(t)$ を求める分析手段とし、

第2の分析手段を、

シースたて波反射波又はシースのたて波反射波とモード変換波との混合波をシースたて波反射波の起生時刻 t_h と所定の t_a 値で定義される $TGC(t)$ 関数を用いて、前記 $GA_j(t)$ 波より $GB_j(t)$ を $GB_j(t) = TGC(t) \cdot GA_j(t)$ により切り出し、対応するスペクトル $FB_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、

前記シース内充填有無分析手段を、

前記第1の分析手段と第2の分析手段の繰り返しを、前記 $f \sim_k$ の初期値を 30 kHz 、 $f \sim_k = 1.0$ 又は 2.0 kHz として $f \sim_k = f \sim_k + f \sim_k$ の計算の都度、前記第1の分析手段、第2の分析手段で前記 $FB_j(f)$ を求め、 n を1以上の整数として、 $FB_j(f)$ 又は $FB_j^n(f)$ を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を $f \sim_k$ が 60 kHz になるまで繰り返し行うこととし、 $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、 $38 \text{ kHz} \sim 65 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k 、 $15 \text{ kHz} \sim 30 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s として特定する構成とし、

前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定されるコンクリート端面からの反射波 (P_2 波) の起生時刻の 10μ 秒後と前記シースたて波反射波の起生時刻 t_h との差で特定し、

前記 $TGC(t)$ 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h + t_a / 2$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、

前記最大エントロピー法スペクトル表示の $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前記 f_k 又は f_s が特定できた $f \sim_k$ 値に対応する $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シース内部に充填材が完全充填されたシースと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シース内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シースと判断するシース充填有無判断ステップを有する

超音波探査方法。

コンクリート端面からの反射波 (P_2 波) の起生時刻：

$$t[P_2] = 2 \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b_1^2} / V_p$$

10

20

30

40

50

シーステたて波反射波の起生時刻 t_h :

$$t_h[ds|P] = 2\sqrt{\left(\frac{a-\phi}{2}\right)^2 + ds^2} / V_p$$

ここで、 a は発信探触子と受信探触子の間隔、 ds は計測対象シースの埋め込み深さ（シース表面）、 b_1 は計測位置からコンクリート端面までの距離、 V_p は計測対象コンクリートのたて波（P波）音速、 ϕ は探触子径である。

10

【請求項6】

超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを1対の探触子として備えた超音波探査装置を用いた超音波探査方法であって、

計測対象シースの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シースの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記1対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シースに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$; $n_w - 1$ は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j = n_w}(t)$ として、シース充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求め、分析用画面に $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描きする表示ステップと、

20

$G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対してシース内充填有無分析手段を適用し、第1の分析手段と第2の分析手段による分析を行い、未充填又は充填不足シース反射波の卓越振動数 f_k 又は充填シース反射波の卓越振動数 f_s を特定するシース内充填有無分析ステップとを有し、第1の分析手段を、

シーステたて波反射波又はシースのたて波反射波とモード変換波との混合波をシーステたて波反射波の起生時刻 t_h と所定の t_a 値で定義される $TGC(t)$ 関数を用いて、前記 $G_j(t)$ 波より $GA_j(t)$ を $GA_j(t) = TGC(t) \cdot G_j(t)$ により切り出し、対応するスペクトル $FA_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、

30

第2の分析手段を、
所定値 $f \sim_k$ (なお、 $f \sim$ は数式において f の上に “ \sim ” を付された符号を表す。以下同じ。) を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f \sim_k$ で 1.0 、 $f = 2f \sim_k$ で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と1以上の整数 n_1 を用いて $FB_j(f) = A^{n_1}(f) \cdot FA_j(f)$ により $FB_j(f)$ を求め、 $FB_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 $GB_j(t)$ を求める分析を前記 $f \sim_k$ の初期値を 30 kHz 、 $f \sim_k = 1.0$ 又は 2.0 kHz として $f \sim_k = f \sim_k + f \sim_k$ の計算の繰り返しの都度 $FB_j(f)$ を求め、 n を1以上の整数として、 $FB_j(f)$ 又は $FB_j^n(f)$ を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を $f \sim_k$ が 60 kHz になるまで繰り返し行い、 $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、 $38 \text{ kHz} \sim 65 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k 、 $15 \text{ kHz} \sim 30 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s として特定する手段とし、

40

前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定されるコンクリート端面からの反射波（ P_2 波）の起生時刻の 10μ 秒後と前記シーステたて波反射波の起生時刻 t_h との差で特定し、

前記 $TGC(t)$ 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h + t_a / 2$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、

前記最大エントロピー法スペクトル表示の $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前

50

記 f_k 又は f_s が特定できた f_k 値に対応する $F B_{j = n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シース内部に充填材が完全充填されたシースと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シース内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シースと判断するシース充填有無判断ステップを有する
超音波探査方法。

コンクリート端面からの反射波 (P_2 波) の起生時刻 :

$$t[P_2] = 2 \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b_1^2} / V_p$$

10

シースたて波反射波の起生時刻 t_h :

$$t_h[ds|P] = 2 \sqrt{\left(\frac{a-\phi}{2}\right)^2 + ds^2} / V_p$$

20

ここで、 a は発信探触子と受信探触子の間隔、 ds は計測対象シースの埋め込み深さ (シース表面)、 b_1 は計測位置からコンクリート端面までの距離、 V_p は計測対象コンクリートのたて波 (P 波) 音速、 ϕ は探触子径である。

【請求項 7】

超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを 1 対の探触子として備えた超音波探査装置を用いた超音波探査方法であって、

計測対象シースの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シースの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記 1 対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シースに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子

30

で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$; $n_w - 1$ は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j = n_w}(t)$ として、シース充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求め、分析用画面に $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描きする表示ステップと、

$G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対してシース内充填有無分析手段を適用し、第 1 の分析手段と第 2

の分析手段による分析を繰り返し、未充填又は充填不足シース反射波の卓越振動数 f_k 又は

充填シース反射波の卓越振動数 f_s を特定するシース内充填有無分析ステップとを有し、
第 1 の分析手段を、
所定値 f_k (なお、 f_k は数式において f の上に “ \sim ” を付された符号を表す。以下同じ。) を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f_k$ で 1.0 、 $f = 2f_k$ で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と 1 以上の整数 n_1 を用いて $F A_j(f) = A^{n_1}(f) \cdot F_j(f)$ により $F A_j(f)$ を求め、 $F A_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 $G A_j(t)$ を求める分析手段とし、

40

第 2 の分析手段を、

シース自励振動でシース廻りコンクリートをシース長手方向に伝達するシース自励 P 波又はシース自励 P 波と S 波の混合波を分析対象波とし、 t_h をシース自励 P 波の起生時刻とし、この t_h と所定の t_a 値で定義される $T G C(t)$ 関数を用いて、前記時系列 $G A_j(t)$ 波より $G B_j(t)$ を $G B_j(t) = T G C(t) \cdot G A_j(t)$ により切り出し、対応するスペクトル $F B_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、

50

前記シース内充填有無分析手段を、

前記第1の分析手段と第2の分析手段の繰り返しを、前記 f_k の初期値を 30 kHz、
 $f_k = 1.0$ 又は 2.0 kHz として $f_k = f_k + f_k$ の計算の都度、前記
 第1の分析手段、第2の分析手段で前記 $F B_j(f)$ を求め、 n を 1 以上の整数として、 $F B_j(f)$ 又は $F B_j^n(f)$ を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を f_k が 60 kHz になるまで繰り返し行うこととし、
 $F B_{j=n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、38 kHz ~ 65 kHz 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k 、15 kHz ~ 30 kHz 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s として特定する構成とし、

前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定される版厚反射 ($dw | M_1$ 波) の起生時刻と前記シース自励 P 波 ($ds | 自 P$) の起生時刻 t_h との差で特定し、

10

前記 TGC (t) 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0、 $t = t_h + t_a / 2$ で 1.0、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、

前記最大エントロピー法スペクトル表示の $F B_{j=n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前記 f_k 又は f_s が特定できた f_k 値に対応する $F B_{j=n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シース内部に充填材が完全充填されたシースと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シース内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シースと判断するシース充填有無判断ステップを有する

20

超音波探査方法。

版厚反射の起生時刻：

$$t[ds|M_1] \approx \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / V_p + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / 0.6V_p$$

30

シース自励 P 波の起生時刻：

$$t_h[ds|自P] = (a + 2ds) / \beta \cdot V_p$$

ここで、 a は発信探触子と受信探触子の間隔、 dw はコンクリート版厚、 ds はシース純かぶり厚、 V_p は計測対象コンクリートのたて波 (P 波) 音速、 β は探触子径、 β はシース自励 P 波 ($ds | 自 P$) の起生時刻算定用補正係数である。

40

【請求項 8】

超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを 1 対の探触子として備えた超音波探査装置を用いた超音波探査方法であって、

計測対象シースの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シースの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記 1 対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シースに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$; $n_w - 1$ は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j=n_w}(t)$ として、シース充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求

50

め、分析用画面に $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描きする表示ステップと、
 $G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対してシースイ充填有無分析手段を適用し、第1の分析手段と第2
 の分析手段による分析を行い、未充填又は充填不足シースイ反射波の卓越振動数 f_k 又は充
 填シースイ反射波の卓越振動数 f_s を特定するシースイ充填有無分析ステップとを有し、
 第1の分析手段を、

シースイ自励振動でシースイ廻りコンクリートをシースイ長手方向に伝達するシースイ自励P波又
 はシースイ自励P波とS波の混合波を分析対象波とし、 t_h をシースイ自励P波の起生時刻と
 し、この t_h と所定の t_a 値で定義される $TGC(t)$ 関数を用いて、前記 $G_j(t)$ 波よ
 り $GA_j(t)$ を $GA_j(t) = TGC(t) \cdot G_j(t)$ により切り出し、対応するスペクトル
 $FA_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、

10

第2の分析手段を、所定値 $f \sim_k$ (なお、 $f \sim$ は数式において f の上に “ \sim ” を付された
 符号を表す。以下同じ。)を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f \sim_k$ で 1.0 、 $f = 2f \sim_k$
 で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と1以上の整数 n_1 を用いて $FB_j(f) = A^{n_1}(f) \cdot FA_j(f)$
 により $FB_j(f)$ を求め、 $FB_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する
 時系列波 $GB_j(t)$ を求める分析を前記 $f \sim_k$ の初期値を 30 kHz 、 $f \sim_k = 1.0$
 又は 2.0 kHz として $f \sim_k = f \sim_k + f \sim_k$ の計算の繰り返しの都度 $FB_j(f)$ を
 求め、 n を1以上の整数として、 $FB_j(f)$ 又は $FB_j^n(f)$ を j に関する個々のスペク
 トル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を $f \sim_k$ が 60 kHz
 になるまで繰り返し行い、 $FB_{j=n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エ
 ントロピー法スペクトル表示手段を用いて、 $38 \text{ kHz} \sim 65 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じる
 スペクトルの中心振動数をシースイ反射波の卓越振動数 f_k 、 $15 \text{ kHz} \sim 30 \text{ kHz}$ 振動
 数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシースイ反射波の卓越振動数 f_s として特定する
 構成とし、

20

前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定される版厚反射 (dw
 $|M_1$ 波) の起生時刻と前記シースイ自励P波 ($ds|自P$) の起生時刻 t_h との差で特定
 し、

前記 $TGC(t)$ 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim$
 t_h で 0.0 、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関
 数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 t
 $= t_h + t_a / 2$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、

30

前記最大エントロピー法スペクトル表示の $FB_{j=n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前
 記 f_k 又は f_s が特定できた $f \sim_k$ 値に対応する $FB_{j=n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s
 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペク
 トルが無い場合、計測対象シースイ内部に充填材が完全充填されたシースイと判断し、 f_s 位
 置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペク
 トルが有る場合、計測対象シースイ内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不
 完全充填シースイと判断するシースイ充填有無判断ステップを有する

超音波探査方法。

版厚反射の起生時刻：

40

$$t[dw|M_1] \approx \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / V_p + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / 0.6V_p$$

シースイ自励P波の起生時刻：

$$t_h[ds|自P] = (a + 2ds) / \beta \cdot V_p$$

ここで、 a は発信探触子と受信探触子の間隔、 dw はコンクリート版厚、 ds はシースイ

50

純かぶり厚、 V_p は計測対象コンクリートのたて波（P波）音速、 r は探触子径、 K はシース自励P波（ d_s | 自P）の起生時刻算定用補正係数である。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、例えば、超音波を発受信し、コンクリート内部に内在するシースに充填された充填材の充填状態を計測する反射波又は自励振動波卓越振動数を利用した超音波探査装置及び超音波探査方法に関する。

【背景技術】

【0002】

高速道路プレストレストコンクリート（PC）橋梁、新幹線PC橋梁等、過去に建設されて供用中、あるいは建設中のPC構造物の数は膨大である。これらのPC構造物のうち長大径間橋梁は、各コンクリート構造部位内部に直径35mm～90mm程度のシースを埋め込み、シース内部に鋼棒、鋼線又は鋼より線を配し、コンクリート構造部位の硬化後、これらの鋼線（鋼棒）を強力に緊張することで、引っ張りに対して弱いコンクリートを用いて長大径間の橋梁が建設されている。

【0003】

このようなPC橋梁において現在、大きな問題が生じている。PC橋梁は、橋梁施工時において、シース内部に配置した鋼線（鋼棒）を緊張し、シース内部にセメントミルク（グラウト）を圧入充填するが、建設時の圧入機の能力及びグラウトの材質等が影響し、グラウトが充填されていないシース及びグラウトが完全に充填ができず空隙があるシース（以下において、これらを総称して不完全充填シースという）が多数存在することが確認されている。

【0004】

このような不完全充填シースの場合、長年経過の経緯の中で、何らかの経路でシース内に雨水が浸透すると、シース内部の鋼線（鋼棒）が浸透した雨水により腐食し、強力に緊張されている鋼線（鋼棒）が腐食によって突然破断するおそれがある。実際、海外で同種のPC橋梁が鋼線（鋼棒）の腐食破断により落橋するという重大事故も報告されている。

【0005】

このような背景下において、旧日本道路公団は、コンクリート構造部位の中にシースを埋め込む工法を一時中止していたが、シースを埋め込む工法を用いないことに伴う建設工事費の増大、そしてPC構造物の安全性・耐久性の確保の観点より、この工法の再開が熱望されていた。

【0006】

この工法を再開するために、この工法に関する方法論の構築に関する研究が鋭意なされ、高速道路PC橋梁の竣工時に、シース内のグラウト充填の有無を、つまり完全充填シースか不完全充填シースかをコンクリート表面から広帯域超音波を用いて非破壊で探査する方法と装置が開発されている（特許文献1、2）。

また、国又は民間の幾つかの研究機関が、衝撃弾性波を用いて、同種のテーマで研究開発を進めている。

【0007】

このように、コンクリート表面からグラウト充填の有無の非破壊で探査する技術が開発されたことにより、2004年以降、コンクリート構造部位の中にシースを埋め込む工法が再開され、新設PC橋梁ではその竣工時に前記シース内のグラウト充填の有無を、超音波探査装置を用いて行うことが施工仕様書で義務付けられている。

【0008】

しかし、特許文献1で提案された非破壊探査方法及び装置を用いた場合であっても、例えば、シース径が30～60mm程度の細径シースである場合、反射波の形態が異なるため、シース内のグラウト充填の有無を正確に探査することはできなかった。

10

20

30

40

50

【 0 0 0 9 】

また、シースが埋め込まれたコンクリート構造部位の形状によっては、一对の探触子を計測対象シースの直上のコンクリート面に配することはできず、計測対象シースの側方のコンクリート面に一对の探触子を配して計測することになる。

【 0 0 1 0 】

このような横計測に、特許文献 1 で提案された非破壊探査方法及び装置を用いると、シース内のグラウト充填が不完全で、管内上部に空洞（空隙）が生じた不完全充填シースであっても、管内部の鋼線（鋼棒）による反射波が大きく生じ、不完全充填シースを完全充填シースと誤計測することがあった。

【 0 0 1 1 】

特許文献 1 に記載の別の探査方法では、（ 1 ）探触子を計測対象直上コンクリート面に置く計測で、探触子間隔 a の連続変動による加算平均波を取得し、（ 2 ）反射波の卓越する概略振動数の中帯域スペクトルを求め（中心周波数を 70 kHz として、受信波スペクトルより抽出している。）、（ 3 ）外周シース回折波を（ 2 ）の中帯域スペクトルに対応する時系列より抽出し、そのスペクトルを比較表示する時、スペクトル値の大小関係をシース充填度と関連させている（図 1（ a ））。

【 0 0 1 2 】

しかし、図 1（ b ）に示す外周シース回折波はシース径が小さくなると、その振幅が小さくなり、何らかの原因で生じる妨害波の中に埋もれてしまい、結果として、細径シースの充填有無探査には利用できない。

【 0 0 1 3 】

特許文献 1 に記載の他の探査方法では、（ 1 ）探触子を計測対象直上コンクリート面に置く計測で、探触子間隔 a の連続変動による加算平均波を取得し、（ 2 ）反射波の卓越する振動数の狭帯域スペクトルを求め（中心周波数を 70 kHz として、受信波スペクトルより抽出している。）、（ 3 ）図 2 に示すシース自励波を（ 1 ）の加算平均波の時刻歴後方で抽出している。

【 0 0 1 4 】

これは、所定値 t_T を時刻後方へ移動しながら図 2 の 印で示す時刻帯域の時系列を抽出し、対応するスペクトルを比較表示していくとシースが空又は充填不足の時、同一形状スペクトルとなり、そのスペクトル値が充填度と相関し、シースが充填の場合はスペクトル値が小さく空又は充填不足シースの場合と、同一形状スペクトルとならないとする分析法である。

【 0 0 1 5 】

このように、特許文献 1 に記載の他の探査方法では、受信波の中に図 2 のシース自励振動波が重畳し、受信波の時刻後方の 印で囲む波の中で、前記自励波が卓越する現象に基づく分析法である。

しかし、この現象はシース径が太い時に顕著であるが、既設 PC 橋梁の細径シースの場合は、大きい振幅の受信波の中にシース自励波が埋没し、探査不能又は誤計測する頻度が大きくなるという問題点を有する。

【 0 0 1 6 】

一方、特許文献 2 に記載の探査方法では、（ 1 ）探触子間隔 a を広くして単一点計測し、（ 2 ）コンクリート面及びシース表面間の重複反射波を抽出し、（ 3 ）空シースの場合、高振動数側にスペクトルが起生し、一方、充填シースの場合、低振動数側にスペクトルが起生することを利用している（図 3（ a ））。

【 0 0 1 7 】

さらに、特許文献 2 に記載の別の探査方法では、（ 1 ）重複反射波の起生時刻前方の微弱な A 領域の波を抽出し、（ 2 ）空シースの場合、高振動数側にスペクトルが起生する。一方、充填シースの場合、低振動数側にスペクトルが起生することを利用している（図 3（ b ））。

【 0 0 1 8 】

10

20

30

40

50

図4(a)のような場合、隣接シースの端面間隔 l が狭い故、探触子間隔 a が狭いと受信波に計測対象シース反射波のみならず、隣接シースからの反射波も混入重畳する。

一方、探触子間隔 a が広くなると、計測対象シースから受信する波は前記重複反射が支配的となり、隣接シースからの重複反射は存在しない(図4(b))。

【0019】

しかし、これらの方法によっても、以下の問題点がある。

シース径が細くなると、又は、シース埋め込み深さが深くなると、分析で用いるシースとコンクリート表面間の重複反射波は、微弱となり又は起生せず、分析不能となる頻度が大きい。また、新設PC橋梁の床版シースは外径80~90mmの太径で、且つ、シースが厚(シース芯)150mm以下でなければ、計測対象とできない。

10

【0020】

新設PC橋梁の他の構造部位のシース(例えば、桁及びウェブ主ケーブルシース)に本計測分析法を適用しても、床版シースと桁及びウェブ主ケーブルシースではシース反射波の起生状況が異なる事により、分析不能又は誤計測が多発する(図5)。

また、計測位置にシース支承治具や、シース長手方向に平行な鉄筋等があると、誤計測する頻度が大きくなる。

【0021】

建設後10年~50年の既設PC橋梁のシースは殆ど細径(30mm~60mm)で薄い鋼製である。また、配筋も不整形な状況が多い。

更に、コンクリートの経年劣化によって生じるコンクリート表面のヘアクラック、コンクリート内部での微細な割れ、セメント質と粗骨材との微々たる剥離等の存在で生じる波が受信波に重畳する。

20

【0022】

これが原因して、前述の特許文献に記載された計測に基いた計測及び分析法を既設PC橋梁のシース充填有無分析に適用しても分析不能となる頻度が大きく、実用に供し得ない場合が多々ある。

【0023】

さらに、衝撃弾性波による充填探査においては、シース充填有無探査が衝撃弾性波計測で可能又は可能性があるとの論文が近時幾つか発表されている。

これは特許文献1に類似した方法であり、コンクリート表面打撃で、コンクリート内に発生する波、つまり、5kHz以下の超低振動数の波を用いることを特徴としている。

30

【0024】

この様な低振動数帯の波は、打撃点と受信点間を、コンクリート表面で伝達する表面波(1)、及びコンクリートを浅くもぐって伝達する直接波(2)及び他の要因で発生する波(端部反射表面波(3)、微細割れ反射波(4))の勢力が探査対象シースからの反射波に比し、極端に大きくなる。

【0025】

加えて、時間軸に対する減衰消滅が長時間となる事により、これ等の外乱波((1)~(4))の中に、計測対象シースからのシース反射波(5)が埋没し、探査不可能となることがあった(図6,7)。

40

【0026】

一方、1960年代以降に建設されてきた多数の既設PC構造物にもシースが埋め込まれており、膨大な数のシース内のグラウト充填有無計測が必要となっている。しかし、このような既設PC構造物に、特許文献2で提案された非破壊探査方法及び装置を用いた場合、不完全充填シースを完全充填シース、完全充填シースを不完全充填シースと誤計測する頻度が大きく、さらに計測結果について計測不能となる場合も多数生じる。

【0027】

詳しくは、上述するシースからの重複反射波等に含まれる充填の有無、つまり完全充填シースか不完全充填シースであることを示すスペクトル情報が、新設PC構造物では他の要因によるスペクトル情報に比べ、相対的に大きくなっているが、既設PC構造物では新設

50

PC 構造物に比べてこの情報が相対的に小さいからと考えられる。

【0028】

これは、以下の原因によって生じる現象であると考ええる。

まず、新設PC 構造物の場合コンクリート打設後の日数が浅いのに対し、既設PC 構造物は建設後10年～50年以上というように打設後の日数が長く経過しているものが多い。コンクリート内部の超音波の伝達状況は、コンクリートの経年変化により大きく変化し、受信波スペクトルの形状が異なってくることが多い。

【0029】

また、PC 構造物の経年変化の1つに、その表面及び内部にひび割れ（粗骨材とセメント材の乖離、鉄筋の微細な腐食）が生ずる。これらの経年変化は極微細であり、PC 構造物の強度や安全性に何ら影響しないものであっても、超音波伝達挙動、つまり受信波スペクトルの形状を大きく変動させることとなる。

10

【0030】

さらに、新設PC 橋梁で用いるシースの材質は多くがポリエチレンであるのに対し、既設PC 橋梁では、薄皮の鋼製であることが多い。

また、新設PC 橋梁で用いるシースの径は、一般に大口径（外径：80mm、90mm）で、埋め込み深さ（コンクリート表面からシース上面までの距離 d_s （図4参照））も一般的に浅い（80mm～120mm）ことにより、特許文献2によるコンクリートとシース間で生じる重複反射を分析対象とすることで、充填有無探査が可能であった。小口径（外径：30mm～60mm）になるとこの重複反射の勢力が微弱となることより、分析が難しく、殆どの場合、分析不能となる。

20

【0031】

既設PC 橋梁のシースは小口径（外径：30mm～60mm）が一般的であり、埋め込み深さも深いものがある（250mm～500mm）。シース径が細径で、埋め込み深さが深くなると、シース反射波の振幅は加速度的に小さくなり、このシース反射波に含まれる充填有無を示すスペクトル情報は極めて微弱となる。その結果、探査困難又は探査不能となると考えられる。

【0032】

新設PC 橋梁床版内のシース管グラウト充填有無検査を確実にを行う為の配慮として、シース管長手方向直上に鉄筋を配さないという条件が課されている。図8（a）に示す配筋でなく図8（b）による配筋で、計測時、受信波に重畳する鉄筋経路波（探査妨害波）を極力低減しなければならなかった。

30

【0033】

しかし、建設後10年～50年以上経過しているような既設PC 橋梁では、上述したような正確な計測の実施のための施工管理は行われていない。さらには、配筋が設計図面通りでない（不整形配筋）ものも多数ある。これより既設PC 橋梁に特許文献2で提案された非破壊探査方法及び装置を用いて受信した受信波には、計測のための施工管理がされていない鉄筋や不整形配筋された鉄筋等からの反射波が大きく重畳し、充填有無を示すスペクトル情報の抽出が困難になる。

【0034】

このような理由により、膨大な数の既設PC 構造物に対して特許文献1, 2で提案された非破壊探査方法及び装置を利用しても、誤計測又は計測不能となるおそれが高かった。

40

【先行技術文献】

【特許文献】

【0035】

【特許文献1】特開2007-139788号公報

【特許文献2】特開2005-148061号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0036】

50

そこでこの発明は、様々な態様のPC構造物であっても、シーす内のグラウト充填の有無を正確に探査することのできる超音波探査装置及び超音波探査方法の提供を目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0042】

請求項1に係る発明は、超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを1対の探触子として備えた超音波探査装置であって、計測対象シーすの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シーすの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記1対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シーすに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$; $n_w - 1$ は前記移動回数)を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j = n_w}(t)$ として、シーす充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求め、 $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描き表示する分析用画面と、 $G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対して第1の分析手段と第2の分析手段による分析を繰り返し、未充填又は充填不足シーす反射波の卓越振動数 f_k 又は充填シーす反射波の卓越振動数 f_s を特定するシーす内充填有無分析手段とを備え、第1の分析手段を、所定値 $f \sim_k$ (なお、 $f \sim$ は数式において f の上に“ \sim ”を付された符号を表す。以下同じ。)を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f \sim_k$ で 1.0 、 $f = 2f \sim_k$ で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と1以上の整数 n_1 を用いて $FA_j(f) = A^{n_1}(f) \cdot F_j(f)$ により $FA_j(f)$ を求め、 $FA_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 $GA_j(t)$ を求める分析手段とし、第2の分析手段を、シーすたて波反射波又はシーすのたて波反射波とモード変換波との混合波をシーすたて波反射波の起生時刻 t_h と所定の t_a 値で定義される $TGC(t)$ 関数を用いて、前記 $GA_j(t)$ 波より $GB_j(t)$ を $GB_j(t) = TGC(t) \cdot GA_j(t)$ により切り出し、対応するスペクトル $FB_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、前記シーす内充填有無分析手段を、前記第1の分析手段と第2の分析手段の繰り返しを、前記 $f \sim_k$ の初期値を 30kHz 、 $f \sim_k = 1.0$ 又は 2.0kHz として $f \sim_k = f \sim_k + f \sim_k$ の計算の都度、前記第1の分析手段、第2の分析手段で前記 $FB_j(f)$ を求め、 n を1以上の整数として、 $FB_j(f)$ 又は $FB_j^n(f)$ を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を $f \sim_k$ が 60kHz になるまで繰り返し行うこととし、 $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、 $38\text{kHz} \sim 65\text{kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシーす反射波の卓越振動数 f_k 、 $15\text{kHz} \sim 30\text{kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシーす反射波の卓越振動数 f_s として特定する構成とし、前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定されるコンクリート端面からの反射波(P_2 波)の起生時刻の $10\mu\text{秒}$ 後と前記シーすたて波反射波の起生時刻 t_h との差で特定し、前記 $TGC(t)$ 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h + t_a/2$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、前記最大エントロピー法スペクトル表示の $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前記 f_k 又は f_s が特定できた $f \sim_k$ 値に対応する $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シーす内部に充填材が完全充填されたシーすと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シーす内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シーすと判断するシーす充填有無判断手段を備えたことを特徴とする。また請求項5に係る発明は、これに対応する超音波探査方法であることを特徴とする。

この発明により、例えば、新設や既設を問わず、また、計測対象であるシーすの形状や

10

20

30

40

50

材質、様々な態様のPC構造物（床版シース、ウェブ桁梁主ケーブルシース、フランジ下面主ケーブルシース）であっても、シース内のグラウト充填の有無を正確に探査することができる。

【0043】

請求項2に係る発明は、超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを1対の探触子として備えた超音波探査装置であって、計測対象シースの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シースの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記1対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シースに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w$; n_w は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j = n_w}(t)$ として、シース充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求め、 $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描き表示する分析用画面と、 $G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対して第1の分析手段と第2の分析手段による分析を行い、未充填又は充填不足シース反射波の卓越振動数 f_k 又は充填シース反射波の卓越振動数 f_s を特定するシース内充填有無分析手段とを備え、第1の分析手段を、シースたて波反射波又はシースのたて波反射波とモード変換波との混合波をシースたて波反射波の起生時刻 t_h と所定の t_a 値で定義される $TGC(t)$ 関数を用いて、前記 $G_j(t)$ 波より $GA_j(t)$ を $GA_j(t) = TGC(t) \cdot G_j(t)$ により切り出し、対応するスペクトル $FA_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、第2の分析手段を、所定値 f_k (なお、 f_k は数式において f の上に“ \sim ”を付された符号を表す。以下同じ。)を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f_k$ で 1.0 、 $f = 2f_k$ で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と1以上の整数 n_1 を用いて $FB_j(f) = A^{n_1}(f) \cdot FA_j(f)$ により $FB_j(f)$ を求め、 $FB_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 $GB_j(t)$ を求める分析を前記 f_k の初期値を 30kHz 、 $f_k = 1.0$ 又は 2.0kHz として $f_k = f_k + f_k$ の計算の繰り返しの都度 $FB_j(f)$ を求め、 n を1以上の整数として、 $FB_j(f)$ 又は $FB_j^n(f)$ を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を f_k が 60kHz になるまで繰り返し行い、 $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、 $38\text{kHz} \sim 65\text{kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k 、 $15\text{kHz} \sim 30\text{kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s として特定する手段とし、前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定されるコンクリート端面からの反射波(P₂波)の起生時刻の10 μ 秒後と前記シースたて波反射波の起生時刻 t_h との差で特定し、前記 $TGC(t)$ 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h + t_a / 2$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、前記最大エントロピー法スペクトル表示の $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前記 f_k 又は f_s が特定できた f_k 値に対応する $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シース内部に充填材が完全充填されたシースと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シース内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シースと判断するシース充填有無判断手段を備えたことを特徴とする。

また請求項6に係る発明は、これに対応する超音波探査方法であることを特徴とする。

【0044】

なお、請求項1又は2において、受信波の中に存在する前記コンクリート端面からの反射波(P₂波)と、シースたて波反射波の存在時刻位置は、それら個々の波の起生時刻を示す以下の式で特定できる。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 6 】

コンクリート端面からの反射波 (P₂ 波) の起生時刻 :

$$t[P_2] = 2 \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b_1^2} / V_p$$

シーステたて波反射波の起生時刻 t_h :

$$t_h[ds|P] = 2 \sqrt{\left(\frac{a-\phi}{2}\right)^2 + ds^2} / V_p$$

10

ここで、a は発信探触子と受信探触子の間隔、ds は計測対象シースの埋め込み深さ (シース表面)、b₁ は計測位置からコンクリート端面までの距離 (図 4 7 参照)、V_p は計測対象コンクリートのたて波 (P 波) 音速、φ は探触子径である。

【 0 0 4 7 】

請求項 3 に係る発明は、超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを 1 対の探触子として備えた超音波探査装置であって、計測対象シースの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シースの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記 1 対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シースに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子で受信波 G_j(t) (j = 1 ~ n_{w-1} ; n_{w-1} は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を G_{j = n_w}(t) として、シース充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び G_j(t) を準備し、G_j(t) をフーリエ変換して、対応するスペクトル F_j(f) を求め、G_j(t) を並列表示、F_j(f) を重ね描き表示する分析用画面と、G_j(t)、F_j(f) に対して第 1 の分析手段と第 2 の分析手段による分析を繰り返し、未充填又は充填不足シース反射波の卓越振動数 f_k 又は充填シース反射波の卓越振動数 f_s を特定するシース内充填有無分析手段とを備え、第 1 の分析手段を、所定値 f[~]_k (なお、f[~] は数式において f の上に “ ~ ” を付された符号を表す。以下同じ。) を用い、f = 0 . 0 で 0 . 0、f = f[~]_k で 1 . 0、f = 2 f[~]_k で 0 . 0 となる sin 関数 A(f) と 1 以上の整数 n 1 を用いて F A_j(f) = A^{n 1}(f) · F_j(f) により F A_j(f) を求め、F A_j(f) を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 G A_j(t) を求める分析手段とし、第 2 の分析手段を、シース自励振動でシース廻りコンクリートをシース長手方向に伝達するシース自励 P 波又はシース自励 P 波と S 波の混合波を分析対象波とし、t_h をシース自励 P 波の起生時刻とし、この t_h と所定の t_a 値で定義される T G C (t) 関数を用いて、前記時系列 G A_j(t) 波より G B_j(t) を G B_j(t) = T G C (t) · G A_j(t) により切り出し、対応するスペクトル F B_j(f) をフーリエ変換で求める分析手段とし、前記シース内充填有無分析手段を、前記第 1 の分析手段と第 2 の分析手段の繰り返しを、前記 f[~]_k の初期値を 3 0 k H z、f[~]_k = 1 . 0 又は 2 . 0 k H z として f[~]_k = f[~]_k + f[~]_k の計算の都度、前記第 1 の分析手段、第 2 の分析手段で前記 F B_j(f) を求め、n を 1 以上の整数として、F B_j(f) 又は F B_jⁿ(f) を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を f[~]_k が 6 0 k H z になるまで繰り返し行うこととし、F B_{j = n_w}(f) スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、3 8 k H z ~ 6 5 k H z 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k、1 5 k H z ~ 3 0 k H z 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s として特定する構成とし、前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定される版厚反射 (d w | M₁ 波) の起生時刻と前記シー

20

30

40

50

ス自励P波 (ds | 自P) の起生時刻 t_h との差で特定し、前記 $TGC(t)$ 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0 、 $t > t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h + t_a / 2$ で 1.0 、 $t > t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、前記最大エントロピー法スペクトル表示の $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前記 f_k 又は f_s が特定できた $f \sim_k$ 値に対応する $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シース内部に充填材が完全充填されたシースと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シース内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シースと判断するシース充填有無判断手段を備えたことを特徴とする。また請求項7に係る発明は、これに対応する超音波探査方法であることを特徴とする。

【0048】

請求項4に係る発明は、超音波を発信する発信探触子と超音波を受信する受信探触子とを1対の探触子として備えた超音波探査装置であって、計測対象シースの断面中心のコンクリート表面に対する略垂線上となり、該コンクリート表面において計測対象シースの長手方向に沿った仮想線分上において、所定の探触子間隔 a で配した前記1対の探触子の前記線分上での移動に伴って、その移動の都度、前記発信探触子より前記シースに向かって、コンクリート内部に超音波を発信し、前記受信探触子で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$; $n_w - 1$ は前記移動回数) を収録し、これ等受信波の加算平均波を $G_{j = n_w}(t)$ として、シース充填有無分析用の受信波と加算平均波の並び $G_j(t)$ を準備し、 $G_j(t)$ をフーリエ変換して、対応するスペクトル $F_j(f)$ を求め、 $G_j(t)$ を並列表示、 $F_j(f)$ を重ね描き表示する分析用画面と、 $G_j(t)$ 、 $F_j(f)$ に対して第1の分析手段と第2の分析手段による分析を行い、未充填又は充填不足シース反射波の卓越振動数 f_k 又は充填シース反射波の卓越振動数 f_s を特定するシース内充填有無分析手段とを備え、第1の分析手段を、シース自励振動でシース廻りコンクリートをシース長手方向に伝達するシース自励P波又はシース自励P波とS波の混合波を分析対象波とし、 t_h をシース自励P波の起生時刻とし、この t_h と所定の t_a 値で定義される $TGC(t)$ 関数を用いて、前記時系列 $G_j(t)$ 波より $GA_j(t)$ を $GA_j(t) = TGC(t) \cdot G_j(t)$ により切り出し、対応するスペクトル $FA_j(f)$ をフーリエ変換で求める分析手段とし、第2の分析手段を、所定値 $f \sim_k$ (なお、 $f \sim$ は数式において f の上に“ \sim ”を付された符号を表す。以下同じ。) を用い、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f \sim_k$ で 1.0 、 $f > 2f \sim_k$ で 0.0 となる \sin 関数 $A(f)$ と1以上の整数 $n1$ を用いて $FB_j(f) = A^{n1}(f) \cdot FA_j(f)$ により $FB_j(f)$ を求め、 $FB_j(f)$ を逆フーリエ変換して、対応する時系列波 $GB_j(t)$ を求める分析を前記 $f \sim_k$ の初期値を 30 kHz 、 $f \sim_k = 1.0$ 又は 2.0 kHz として $f \sim_k = f \sim_k + f \sim_k$ の計算の繰り返しの都度 $FB_j(f)$ を求め、 n を1以上の整数として、 $FB_j(f)$ 又は $FB_j^n(f)$ を j に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を $f \sim_k$ が 60 kHz になるまで繰り返し行い、 $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示手段を用いて、 $38 \text{ kHz} \sim 65 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k 、 $15 \text{ kHz} \sim 30 \text{ kHz}$ 振動数帯域に生じるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s として特定する構成とし、前記所定の t_a 値を、コンクリート形状で生じ、下記の計算で特定される版厚反射 (dw | M₁ 波) の起生時刻と前記シース自励P波 (ds | 自P) の起生時刻 t_h との差で特定し、前記 $TGC(t)$ 関数を、前記所定の係数 t_h 、 t_a を用い、台形関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h \sim t_h + t_a$ で 1.0 、 $t > t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数となり、あるいは \sin 形状関数又は円弧形状関数の場合は $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h + t_a / 2$ で 1.0 、 $t > t_h + t_a$ で 0.0 となる形状の関数とし、前記最大エントロピー法スペクトル表示の $FB_{j = n_w}(f)$ スペクトルの変化の推移で前記 f_k 又は

10

20

30

40

50

f_s が特定できた f_k 値に対応する $F B_{j = n_w}(f)$ スペクトルにおいて f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シース内部に充填材が完全充填されたシースと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シース内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シースと判断するシース充填有無判断手段を備えたことを特徴とする。また請求項 8 に係る発明は、これに対応する超音波探査方法であることを特徴とする。

【0049】

なお、請求項 3 又は 4 において、受信波の中に存在する前記 $d w | M_1$ 波、シース自励 P 波の存在時刻位置は、それら個々の波の起生時刻を示す以下の式で特定できる。
版厚反射の起生時刻：

$$t[dw|M_1] \approx \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / V_p + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / 0.6V_p$$

シース自励 P 波の起生時刻：

$$t_h[ds|自P] = (a + 2ds) / \beta \cdot V_p$$

ここで、 a は発信探触子と受信探触子の間隔、 $d w$ はコンクリート版厚、 $d s$ はシース純かぶり厚、 V_p は計測対象コンクリートのたて波（P 波）音速、 β は探触子径、 β はシース自励 P 波（ $d s | 自 P$ ）の起生時刻算定用補正係数である。

【0056】

この発明により、やはり、例えば、新設や既設を問わず、また、計測対象であるシースの形状や材質、様々な態様の PC 構造物（床版シース、ウェブ主ケーブルシース、桁梁主ケーブルシース、フランジ下面主ケーブルシース）であっても、シース内のグラウト充填の有無を正確に探査することができる。

【発明の効果】

【0059】

本発明により、様々な態様の PC 構造物であっても、シース内のグラウト充填の有無を正確に探査することのできる反射波又は自励振動波卓越振動数を利用した超音波探査装置及び超音波探査方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0060】

【図 1】従来技術を用いたシース充填有無計測についての概略説明図。

【図 2】シース内におけるグラウト充填の有無によって生ずる物理現象について説明する説明図。

【図 3】従来技術を用いたシース充填有無計測についての概略説明図。

【図 4】シース充填有無計測で得る受信波についての説明図。

【図 5】シース内におけるグラウト充填の有無によって生ずる物理現象について説明する説明図。

【図 6】衝撃弾性波による充填探査についての説明図。

【図 7】衝撃弾性波による充填探査で得る受信波についての説明図。

【図 8】施工管理によるシースと鉄筋の位置関係について説明する説明図。

【図 9】本発明に係る超音波探査装置の説明図。

【図 10】本発明に係る超音波探査装置の発信探触子の説明図。

【図 11】本発明に係る超音波探査装置の受信発信探触子の説明図。

【図 12】特許文献 1 で用いる分析対象波の説明図。

- 【図13】特許文献2で用いる分析対象波の説明図。
- 【図14】シースかぶり厚が深い時の計測と充填有無分析対象波の説明図。
- 【図15】シースかぶり厚が浅い時の計測と充填有無分析対象波の説明図。
- 【図16】第1の対処法でのシース充填有無計測で得る受信波模式図。
- 【図17】第1の対処法でのシース充填有無計測で得る受信波についての説明図。
- 【図18】計測対象シース反射波101にTGC(t)関数を乗算し、計測対象シース反射波101のP波だけを切り出した切り出し波についての説明図。
- 【図19】完全充填シースを不完全充填シースと誤計測するスペクトルの比較についての説明図。
- 【図20】加算平均処理による表1のNo.3,4,5のスペクトルの変化についての説明図。 10
- 【図21】シース充填有無分析スペクトル形状についての説明図。
- 【図22】 f_k スペクトルの大小が生ずる原因についての説明図。
- 【図23】鋼製不完全充填シース直上コンクリート面での探触子移動計測(探触子間隔 $a = 250\text{mm}$)で得た受信波(No.1~No.4)と加算平均波(No.5)のスペクトルについての説明図。
- 【図24】加算平均波に $A_n(f)$ フィルタリング処理波関数を乗じたスペクトルについての説明図。
- 【図25】計測対象波毎の充填有無計測結果についての説明図。
- 【図26】計測対象波毎の充填有無計測結果についての説明図。 20
- 【図27】第2の対処法でのシース充填有無計測で得る受信波模式図。
- 【図28】第2の対処法でのシース充填有無計測で得る受信波についての説明図。
- 【図29】分析で用いるシース伝達波(自励波)の説明図。
- 【図30】シース充填時の分析対象波(シース反射波、シース自励波)のスペクトル形状の説明図。
- 【図31】既設PC橋梁シース配置状況例の説明図。
- 【図32】かぶり厚の深い側壁鉛直シースの計測図。
- 【図33】シース充填有無分析用時系列の説明図。
- 【図34】シース反射波のスペクトル(台形関数切り出し)の説明図。
- 【図35】シース反射波のスペクトル(sin形状関数切り出し)の説明図。 30
- 【図36】シース反射波(P波)による充填有無分析の説明図。
- 【図37】シース反射波(M_1 波)による充填有無分析の説明図。
- 【図38】既設PC橋梁についての説明図。
- 【図39】既設PC橋梁の鉄筋及び主ケーブルの配置状況の説明図。
- 【図40】多点計測受信波と加算平均波並列表示の説明図。
- 【図41】シース充填時分析例の説明図。
- 【図42】シース内空時分析例の説明図。
- 【図43】側壁主ケーブルシース計測図の説明図。
- 【図44】側壁主ケーブルシース自励波スペクトル($a = 250\text{mm}$)の説明図。
- 【図45】側壁主ケーブルシース自励波スペクトル($a = 375\text{mm}$)の説明図。 40
- 【図46】空シース自励波の存在を示す分析事例(FFT表示)の説明図。
- 【図47】コンクリート構造形状で生ずる各種反射波。
- 【図48】シース埋め込みモデル受信波と、シース反射波、コンクリート形状で生ずる各種反射波起生時刻($ds = 170\text{mm}$)。
- 【図49】図47に示すモデル($ds = 170\text{mm}$)のシース反射波(P波)による充填有無分析の説明図1。
- 【図50】TGC(t)関数による切り出し波($ds = 170\text{mm}$)。
- 【図51】図47に示すモデル($ds = 170\text{mm}$)のシース反射波(P波)による充填有無分析の説明図2。
- 【図52】 P_2 後方波 + S_2 | M_1 波、及び30cm版厚反射波(dw | P)の卓越振動 50

数スペクトル。

【図53】シース埋め込みモデル受信波と、シース自励波、コンクリート形状で生ずる各種反射波起生時刻 ($d_s = 70 \text{ mm}$)。

【図54】シース埋め込みモデル受信波と、シース自励波、コンクリート形状で生ずる各種反射波起生時刻 ($d_s = 70 \text{ mm}$)。

【図55】探触子間隔 a の大小関係による版厚反射波の P 波、 M_1 波、 M_2 波の振幅の変化。

【図56】桁梁フランジ部の下面計測図。

【図57】桁梁フランジ部充填シースの下面計測、自励振動 P 波、S 波による充填有無分析の説明図。

【図58】桁梁フランジ部空シースの下面計測、自励 P 波、自励 P 波 + 自励 S 波、自励 S 波による充填有無分析の説明図。

【図59】桁梁フランジ部空シースの下面計測、自励 P 波による充填有無分析の説明図。

【発明を実施するための形態】

【0061】

この発明の一実施形態を以下図面と共に説明する。

図面は既設 PC 橋梁のシース充填状況の超音波探査方法およびその装置を示すが、まず、図9を参照して既設 PC 橋梁のシース充填状況の超音波探査装置の構成について説明する。

【0062】

被探知体としての既設 PC 橋梁 30 の表面に接触配置する発信探触子 31 と受信探触子 32 とを設けている。上述の発信探触子 31 は超音波を発信するものであり、上述の受信探触子 32 は超音波を受信するものである。

【0063】

上述の発信探触子 31 には超音波発信装置の電流供給回路 33 から電流が供給され、この発信探触子 31 から超音波が発信して既設 PC 橋梁 30 内に入射する。

【0064】

また、受信探触子 32 が受信した超音波信号は解析装置 34 に入力されて解析される。

この解析装置 34 においては、受信探触子 32 の受信信号が増幅回路 35 により増幅された後、フィルタ回路 36 でフィルタリングを受けた信号が AD 変換回路 37 (アナログ・デジタル変換回路) によってデジタル信号に変換され、ゲートアレイ 38 を介して CPU 40 に入力される。

【0065】

ハードディスク 39 には解析処理アプリケーションソフトウェアと、CPU 40 により演算処理された時系列データが保存される。ここで、上述の CPU 40 はフーリエ変換・フーリエ逆変換を行う制御手段 (処理部) である。

【0066】

また、上述の解析結果は表示装置 41 にも入力されて表示される。この表示装置 41 は図21に示すような各種の波形を可視表示する表示手段である。

【0067】

さらに、必要な情報が入力手段としてのキーボードなどの入力装置 42 から CPU 40 に入力されるように構成している。メモリ 43 は CPU 40 が演算する際にデータを一時的に格納するために用いられる。また、CPU 40 からコントロール回路 44 に制御信号が出力され、コントロール回路 44 は増幅回路 35、フィルタ回路 36、AD 変換回路 37、ゲートアレイ 38 および電流供給回路 33 に作動指令信号を出力する。

【0068】

電流供給回路 33 は同軸ケーブル 45 を介して発信探触子 31 に接続されており、発信探触子 31 には図10に示すように、基盤化されたステップ型電圧発生器 46 と振動子 47 とが内蔵されている。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 9 】

電圧発生器 4 6 には、電圧駆動回路と電圧発生回路とが設けられており、電圧駆動回路で発生する電圧を振動子 4 7 に印加する。

【 0 0 7 0 】

超音波を既設 P C 橋梁 3 0 に入力する都度、受信探触子 3 2 で受信波を得る。

この受信波は同軸ケーブル 4 9 を介して、解析装置 3 4 の増幅回路 3 5 へ電圧の時間変動データとして送られる。増幅回路 3 5 へ送られた時間変動データは、フィルタ回路 3 6 を介して A D 変換回路 3 7 に達し、この電圧のアナログ量が該 A D 変換回路 3 7 によりデジタル量に変換され、ゲートアレイ 3 8 を介して C P U 4 0 に転送され、電圧デジタル値の時刻歴が表示装置 4 1 に表示される。

10

【 0 0 7 1 】

自動的に、またはキーボードなどの入力装置 4 2 を用いた外部からの指示で、電圧の増幅または減幅およびローパス / ハイパスフィルタ処理の指令が C P U 4 0 に伝達され、C P U 4 0 はコントロール回路 4 4 を介して増幅回路 3 5 およびフィルタ回路 3 6 を制御する。

【 0 0 7 2 】

図 1 1 に示すように、受信探触子 3 2 には漸減型ハイパスフィルタ回路 5 0、増幅回路 5 1 および振動子 5 2 が内蔵されている。

電流供給回路 3 3 はコントロール回路 4 4 により制御されて、所定の時間間隔で動作する。

20

【 0 0 7 3 】

受信探触子 3 2 に内蔵された振動子 5 2 (図 1 1 参照) は超音波が入力する都度、既設 P C 橋梁 3 0 の音圧変化にともなって振動が励起する。この振動励起で振動子 5 2 に生じる電圧の時間変化が、受信探触子 3 2 内のフィルタ回路 5 0 および増幅回路 5 1 で 1 次処理される。

【 0 0 7 4 】

図 9 の増幅回路 3 5 およびフィルタ回路 3 6 の制御が終了した段階で、C P U 4 0 の指示でコントロール回路 4 4 が動作し、ゲートアレイ 3 8 に受信波の加算処理を命令する。

【 0 0 7 5 】

ゲートアレイ 3 8 は、A D 変換回路 3 7 で得られる電圧に関する時刻歴デジタル量を、上記時刻歴を得る都度、指定回数加算する。そして、C P U 4 0 のコントロール下にて加算平均時刻歴を作成し、表示装置 4 1 にその時刻歴をリアルタイム表示する。

30

【 0 0 7 6 】

フィルタ回路 5 0、3 6 および増幅回路 5 1、3 5 は受信探触子 3 2 と解析装置 3 4 との双方にそれぞれ内蔵されている。受信探触子 3 2 に内蔵されているハイパスフィルタ回路 5 0 および増幅回路 5 1 は受信波に対して 1 次処理を行なうものであり、解析装置 3 4 に内蔵されている増幅回路 3 5 とフィルタ回路 3 6 は、1 次処理された受信波に対し、C P U 4 0 のコントロール下にて微調整するものである。この微調整は装置機能の高度化のために必要なものであるから、これら増幅回路 3 5、フィルタ回路 3 6 は省略してもよい。

40

【 0 0 7 7 】

次に、既設 P C 橋梁のシース充填状況の超音波探査方法について説明する。

本願発明の課題の解決のため、本願発明の分析で用いる波の種類を、特許文献 1 及び特許文献 2 で用いる波とは異なる波とする。

特許文献 1 での分析対象波は、図 1 2 に示す 3 種類の波のいずれかである。

- (1) シースが埋め込まれた板の版厚反射波。
- (2) シース円周上を回折するシース外周回折波。
- (3) 受信波の時刻後方に残存するシース自励振動波。

特許文献 2 での分析対象波は、図 1 3 に示すコンクリート面とシース間を重複反射して受信される波 (重複反射波 (Q 波)) である。シース径 は太く、例えば、 8 0 ~ 9 0

50

mmであり、かつ、かぶり厚が浅い（例えば、150mm以下）場合、この前進重複反射が相対的に（探査妨害波に比し）大きくなる。

【0078】

これらに対し、本願発明の分析対象とする既設PC橋梁の径30～60mmの細径薄鋼シースの充填有無探査の場合、図13の重複反射波（Q波）はほとんど起生しない。この場合、特許文献2による充填有無探査は分析不能となるため2つの対処法を考案している。

【0079】

（1）第1の対処法

シースかぶり厚が深い（150mm以上）場合、図14に示す計測で得るシース反射波の加算平均波（P波（たて波）、 M_1 波（往路：たて波／復路：よこ波）及び M_2 波（往路：よこ波／復路：よこ波））のうち、P波及び M_1 波を分析の対象波とする。

探触子間隔aを図示するように狭くして得る受信波を、a値を一定に保ちながら離散化移動する毎に収録し、これ等複数の受信波の時系列領域での加算平均波を分析対象波とする。

【0080】

（2）第2の対処法

シースかぶり厚が浅い（150mm以下）場合、図15に示す計測で得るシース伝達波（以下、「シース自励波」という。）の加算平均波を分析の対象波とする。

具体的には、発信探触子からコンクリートを介して、シースに達するたて波が空シースを自励振動させ、この波がシース廻り長手方向にコンクリート内を伝達して、図15に示す経路で受信探触子で受信される。

探触子間隔aを図示するように広くして得る受信波をa値を一定に保ちながら、離散化移動（移動量a）する毎に収録し、これら複数の受信波の時系列領域での加算平均波を分析対象波とする。

【0081】

以降、分析結果のスペクトル表示が成されているが、FFT解析で得るスペクトル及び最大エントロピー分析で得るスペクトルのどちらの表示でも構わない。

特記なき場合、最大エントロピー分析によるスペクトル表示としている。

なお、FFT解析で得るスペクトルをMEMスペクトル、最大エントロピー分析で得るスペクトルをMEMスペクトルということにする。

【0082】

以下、かぶり厚の深い（150mm以上）細径薄鋼シースの充填有無探査について説明する。

〔分析で用いる物理現象1〕

探触子間隔aを狭くした計測での個々の要因による反射波などと、シース反射波のこれらの合成波（受信波）の模式図を図17に示す。

【0083】

このシース充填有無計測では、発信探触子111と、受信探触子112とを所定間隔である探触子間隔aで配置した探触子組110を、計測対象シース210が内在するコンクリート200における計測対象シース210の直上のコンクリート面201において、図16に示すシース長手方向Lへ移動させる。

【0084】

このシース長手方向Lへの探触子組110の移動に伴って、発信探触子111より計測対象シース210に向かってコンクリート200の内部に超音波を発信し、受信探触子112で受信波を受信し、前記移動の都度得る複数の受信波を時系列領域で加算平均し、加算平均波を得る。

【0085】

つまり、計測対象シース反射波101（P波、 M_1 波、 M_2 波）の中に、シースの充填、空（充填不足含む）の情報（以下、「充填有無の情報」という。）が隠れているが、実

10

20

30

40

50

際の受信波はこの計測対象シーす反射波 1 0 1 の上に、鉄筋反射波 1 0 2、微細割れ反射波 1 0 3、表面波 1 0 4 の波が重畳する事より、図 1 7 の重畳波 (1 0 1 + 1 0 2 + 1 0 3 + 1 0 4) になる。

【 0 0 8 6 】

これより、前記移動の都度に得る個々の受信波 (重畳波) の場合、計測対象シーす反射波 1 0 1 の P 波又は M_1 波又は M_2 波に含まれる前記充填有無の情報を取り出す事が極めて困難となり、劣化の激しいあるいは密配筋されたコンクリートに埋め込まれたシーすの場合、殆ど探査不能となる。

【 0 0 8 7 】

なお、P 波は往路、復路共たて波とし、 M_1 波は往路をたて波、復路をよこ波、又は往路をよこ波、復路をたて波とする反射波であり、 M_2 波は往路、復路共よこ波とする反射波である。

【 0 0 8 8 】

この様な現象を回避する方法の 1 つに、図 1 6 の矢印の方向へ計測点位置を変化させて、その都度、得る複数の受信波を加算平均すると、この加算波に含まれる鉄筋反射波 1 0 2、微細割れ反射波 1 0 3 の妨害波の量が縮小し、かつ計測対象シーす反射波 1 0 1 の波の量が相対的に拡大増幅して時系列上で計測対象シーす反射波 1 0 1 の波がより支配的な受信波を得るという物理現象 (以下、「現象 A」という。) がある。

【 0 0 8 9 】

図 1 6 の探触子をシーす直上コンクリート表面に配置する計測で、発信探触子 1 1 1 と受信波探触子 1 1 2 の間隔を、所定値 a に固定したまま a ずつ探触子組 1 1 0 を移動し、移動の都度、受信波を得る計測によれば、鉄筋反射波 1 0 2、及び微細割れ反射波 1 0 3 の伝達距離はその都度変化する。

これより探触子組 1 1 0 の移動の都度得られる受信波に含まれる鉄筋反射波 1 0 2、微細割れ反射波 1 0 3 は、各受信波毎にその位相情報が異なったものとなる。

【 0 0 9 0 】

位相の異なる波が加算されると、その波は減衰消滅していく。一方、計測対象シーす反射波 1 0 1 は、その埋め込み深さ d_s がシーす長手方向で変化しなければ、前記探触子の移動によって、その伝達距離が変化しない。これより、前記各受信波に含まれる計測対象シーす反射波 1 0 1 波は位相情報が各々同一となる。位相が同一の波が加算されると、その波は増幅していく。以上が、前記現象 A が生ずる理由である。

【 0 0 9 1 】

ところで、図 1 7 の計測対象シーす反射波 1 0 1 の P 波の起生時刻 t_n を参考に、図 1 8 上段に示す様な T G C (t) 関数を用いて、この時刻帯域の波を計測対象シーす反射波 1 0 1 より切り出すと (T G C (t) 関数を乗算すると) 同図下段に示すシーす反射波 (P 波) を得る。

本実施例では、T G C (t) 関数は、台形であるが、特定の時刻帯域の波を切り出すことができる関数であれば、正弦、円弧等の他の関数でも構わない。

【 0 0 9 2 】

図 1 8 上段の T G C (t) 関数を用いて、図 1 7 の楕円印で囲む時系列を抽出する処理を計測対象シーす反射波 1 0 1、鉄筋反射波 1 0 2、微細割れ反射波 1 0 3、表面波 1 0 4 に対して想定し、各々の切り出された波をフーリエ変換すると表 1 に示すスペクトル (模式図) を得る事ができる。

【 0 0 9 3 】

この表 1 において、No. 1 の矩形印で囲ったスペクトルは反射源が空シーすの時のみに得られるスペクトルであり、No. 2 の矩形印で囲ったスペクトルは反射源が充填シーすの時のみに得られるスペクトルである。

【 0 0 9 4 】

また f_{D1} 、 f_{D2} の間に鉄筋等の反射波スペクトルが卓越してくる。

これらのスペクトルに振動数位置を示すカーソルとして所定振動数 f_s 、 f_k 、 f_{D1}

10

20

30

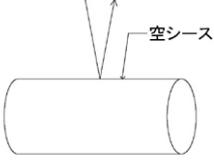
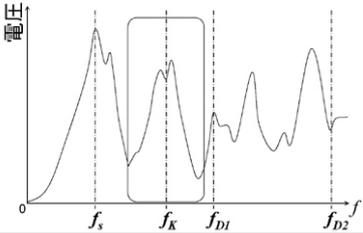
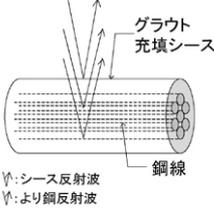
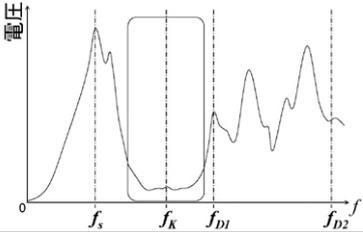
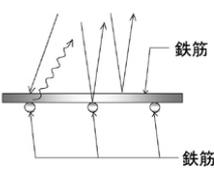
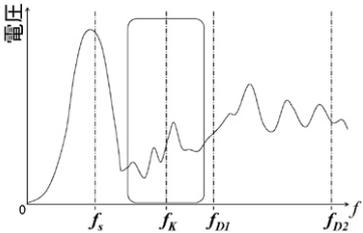
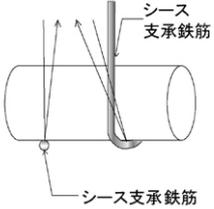
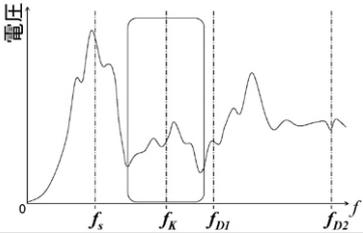
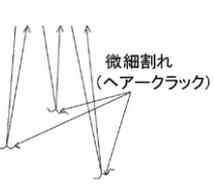
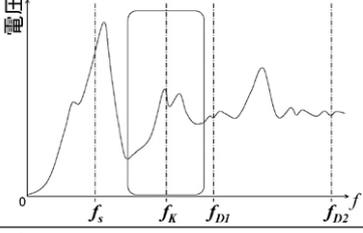
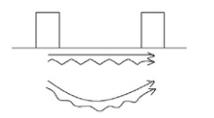
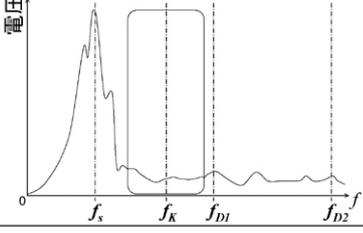
40

50

、 f_{D2} を表記している。

【 0 0 9 5 】

【表 1】

No	反射波の種類	充填有無における反射波	シース反射波起生時刻帯域のスペクトル形状
1	空シース反射波 (101)		
2	充填シース反射波 (101)		
3	シース前方の鉄筋反射波 (102)		
4	シース支承鉄筋等反射波 (102)		
5	コンクリート内微細割れ反射波 (103)		
6	表面波 (104)		

10

20

30

40

【 0 0 9 6 】

振動数 f_s の位置には大きなスペクトルが、No. 1 (空シース)、No. 2 (充填シース) の双方及び No. 3 ~ No. 6 で生じている。

また、 $f_{D1} \sim f_{D2}$ の振動数帯域で、複数の大きなスペクトルが No. 1、No. 2 の双方で同様に生じている。これ等 f_s 、 $f_{D1} \sim f_{D2}$ の振動数帯域で生ずるスペクトルは、シースの空、充填に関係なく大きく卓越している。

一方、振動数 f_k の位置には空シースの時のみ大きなスペクトルが生じ、充填シースの

50

時は殆どスペクトルが生じない。

【 0 0 9 7 】

この現象を後述で実際の計測波を用いて詳述するが、計測対象シースが空か充填かを明確に示す物理現象（以下、「現象 B」という。）と判断する。

尚、 f_s 、 f_k 、 f_{D1} 、 f_{D2} の値はコンクリート強度、シース材質、シース径等に対応して、その概略値が決まる。建設後 10 年以上経過したコンクリート構造物では、 $30 \sim 40 \text{ N/mm}^2$ のコンクリート強度、シース材質が鋼、シース細径（ $30 \sim 60 \text{ mm}$ ）の場合で、 f_s は 20 kHz 前後、 f_k は 40 kHz 前後、 f_{D1} は 50 kHz 前後、及び f_{D2} は 100 kHz 前後となる。

【 0 0 9 8 】

なお、コンクリート打設後数年という経年の短いコンクリート構造物の場合及びコンクリート強度が高くなると（コンクリート音速 V_p が速くなると）、 f_s 、 f_k 、 f_{D1} 、 f_{D2} は相対的に高振動数側へ移動する現象が確認されている。

【 0 0 9 9 】

一方、鉄筋からの反射波の存在で生ずる No. 3、No. 4 のスペクトル、及びコンクリート内微細割れの存在で生ずる No. 5 のスペクトルにおいては、この f_k 前後の振動数位置に比較的大きいスペクトルが生じるのも稀ではない。

【 0 1 0 0 】

これより、計測対象シースが充填シースの場合、図 17 の重畳波（受信波（ $101 + 102 + 103 + 104$ ））での、楕円印で囲む部分の抽出波のスペクトルは、表 1 の No. 2、3、4、5、6 のスペクトルを合成したものとなり、図 19 に示すように充填シースを空シースと誤計測する頻度が大きくなる。

【 0 1 0 1 】

この様な誤計測を回避する為、前記現象 A と現象 B とを組み合わせる分析法を確立する。

現象 A は従来、位置移動加算平均波において、探査対象反射波が、時系列上で明瞭になるという公知の現象であるが、スペクトル上でも類似した現象を生ずる。

【 0 1 0 2 】

図 16 の探触子移動計測の都度計測した受信波より得る表 1 の No. 3、4、5 のスペクトルが図 20 (a) のように f_k 前後の振動数位置でスペクトルが生じていても、これら受信波を加算平均した波より得る No. 3、4、5 の当該スペクトルは、図 20 (b) のように消滅してくる。

【 0 1 0 3 】

この図 20 で示す現象は、 f_k 前後の振動数位置で生ずる探査妨害スペクトルの時系列が、計測位置の移動毎に位相情報が変動する事より生じたものである。

一方、図 16 に示すシース長手方向 L で埋め込み深さ d_s に変化のない探触子移動計測は、発信探触子 111 と受信探触子 112 の間隔を所定値 a に固定したまま、シース長手方向直上コンクリート面で行う事より、計測対象シース反射波 101 の路程長は同一であり、計測対象シース反射波では位相ズレは生じない。

【 0 1 0 4 】

これより、加算平均波に含まれる空シース反射波起生帯域のスペクトルは、表 1 の No. 1 のスペクトルの如くとなり、充填シース反射波のスペクトルは、表 1 の No. 2 のスペクトルの如くとなる。

【 0 1 0 5 】

以上より、個々の受信波の加算平均波より得る前記のスペクトルは、空シースの場合、表 1 の No. 1 スペクトルと、 f_k 付近にスペクトルの生じていない図 20 (b) のスペクトルを合成した、 f_k 前後の振動数位置にスペクトルが生ずるものとなる（図 21 (a) 参照）。

【 0 1 0 6 】

充填シースの場合、表 1 の No. 2 スペクトルと、 f_k 付近にスペクトルの生じていな

10

20

30

40

50

い図20(b)のスペクトルを合成した、 f_k 前後の振動数位置にスペクトルが生じないものとなる(図21(b)参照)。

前記現象Aと現象Bを組み合わせて利用する事で、計測対象シースが空か充填かを探查できる事を示した。

【0107】

[分析で用いる物理現象2]

ところで、前記計測対象シースのコンクリート内埋め込み深さが深い(200mm~500mm)場合、又はコンクリート内鉄筋(シース前方)の配筋ピッチが密な場合(@125mm以下)、空シースを充填シースと誤計測する事がある。

【0108】

コンクリートの様な不均質な材質の場合、超音波は探查経路(計測点からシースまでの距離)が長いと加速度的に減衰する。そして、密配筋の場合、鉄筋の存在で計測点とシース間を伝達する超音波が一部遮断される。そして図17の104波(表1のNo.6のスペクトル参照)の f_s 振動数の浅存波が前記シース反射波(P波、 M_1 波、 M_2 波)に重畳する。これが原因して空シースの場合に生ずる f_k 位置スペクトルが相対的に小さくなる。

【0109】

図22にその様相を示すが、長路程又は密配筋下では、図22(b)に示す様に空シースの場合に生ずる f_k 位置のスペクトルが小さくなる。以下、この物理現象を現象Cと呼ぶ。この物理現象の存在で空を充填と誤計測する事になる。

【0110】

この問題に対処する方法を、第2手段として以下に具体例を用いて説明する。

なお、以下の分析で得るスペクトルの表示はスペクトル値の最大値を表示図面で最大表示している。

【0111】

既設コンクリート橋梁の埋め込み深さ250mmのシースの充填有無探查で、径60mmの鋼製空シース直上コンクリート面での、図14に示す探触子移動計測($a = 250$ mm、 $a = 125$ mm)で得た受信波(No.1~No.4)と加算平均波(No.5)を比較表示して図23に示す。

【0112】

シースかぶり厚は250mmと深く、図14の計測対象シースと、平面的に直交するコンクリート表層配筋ピッチ a_p は@125mmと密配筋である。これより空シースの時生ずる f_k 振動数付近のスペクトルは現象Cの存在で小さい事が予想される。

【0113】

この現象Cで生ずる問題に対処する為に、前記加算平均波スペクトルの f_k 振動数付近のスペクトルを分析の前段として増幅させる事を第2手段とする。第2手段の実行後、前記第1手段で、シース内の充填有無分析を行うと、かぶり厚の深い及び密配筋下の空シースを誤計測する事なく空シースと検査できる。

【0114】

図23に f_k 振動数付近のスペクトルを第2手段を用いて、増幅させた事例を示す。 $A(f)$ を $f = 0$ で0.0、 $f = f_k$ で1.0、 $f = 2f_k$ で0.0とし、 $n = 1 \sim 4$ として、図24(a)が $A_1(f)$ 関数を図23の受信波スペクトル $F_j(f)$ 及び加算平均波スペクトル $F(f)$ に乗じたものであり、図24(b)が $A_1(f)$ 関数をさらに急峻な所定の $A_2(f)$ 関数に取り換えたものである。ここで $f_k = 39$ kHzとしている。

【0115】

受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim 4$)及び加算平均波元波 $G'_5(t)$ 、 $A_1(f)$ フィルタリング処理波 $GA'_5(t)$ 、 $A_2(f)$ フィルタリング処理波 $GA'_j(t)$ 各々より、第1手段を用いて、シース反射波起生時刻 t_h を始点とするシース反射波の起生時刻帯域を切り出し、 $GB_j(t)$ を抽出し、対応するスペクトル $FB_j(f)$ を求め、最大

10

20

30

40

50

エントロピー法スペクトル表示すると、それぞれ図 2 5 (a)、(b)、(c) のようになる。

【 0 1 1 6 】

尚、前記第 2 手段を第 1 手段を処理する前に、受信波 (4 波) と加算平均波との重ね描きスペクトルに対して行う時、充填シースが空シースと誤計測されてはならない。

充填と判っているシースの受信波 (4 波) と加算平均波との重ね描きの場合で、このような誤計測が起こらない事を示しておく。

【 0 1 1 7 】

同一のシースかぶり厚、コンクリート表層配筋同一の充填シースの分析結果を図 2 6 に示す。第 2 手段を成した後、第 1 手段で得たスペクトルでも、加算平均波最大エントロピー法スペクトルで誤る事なく充填シースと計測している。

10

【 0 1 1 8 】

以上、第 2 手段 ($A_1(f)$ 、 $A_2(f)$ 関数の加算平均波スペクトルへの乗算) で、加算平均波を処理して得た波に、第 1 手段 (シース反射波存在時刻帯域の時系列のスペクトル抽出) を施すと、空シースの場合に生ずる f_k 振動数位置のスペクトルの存在を誤る事なく確認できる。

【 0 1 1 9 】

次に、かぶり厚の浅い (1 5 0 mm 以下) 細径薄鋼シースの充填有無探査について説明する。

かぶり厚の浅いシースの充填有無探査を上記の第 1 の対処法に示す図 1 4 の計測法で行っても、分析不能となる。図 1 7 の受信波模式図によれば、浅いシースの場合、計測対象シース反射波 (1 0 1 の P、 M_1 、 M_2 波) が時間軸前方へ移動し、大きな勢力の鉄筋反射波 1 0 2、微細割れ反射波 1 0 3、表面波 1 0 4 の中に埋没するからである。上記の第 2 の対処法の図 1 5 の計測法で得る加算平均波を分析で用いることで初めて充填有無探査が可能となる。

20

【 0 1 2 0 】

探触子間隔 a を広くして、図 1 5 の計測で得る受信波に含まれる個々の要因による反射波及び伝達波と、これ等の合成波 (受信波) の模式図を図 2 7 及び図 2 8 に示す。

【 0 1 2 1 】

図 2 8 で楕円印で示す時刻帯に分析で用いるシース自励波が生じている。探触子間隔 a の長さを調整することで、自励波 (シース経路波) 2 0 1 の上に探査妨害波 2 0 2 (鉄筋反射波)、2 0 3 (直接波)、2 0 4 (表面波 (P 波、S 波)) の大きい振幅部が重畳しないようにすることができる。このようにして、楕円印で囲むシース自励波起生時刻帯域を図 2 8 の 2 0 1 波 ~ 2 0 4 波の各々から抽出することを想定すると、表 1 のいずれかのスペクトルとなる。空シース自励波 2 0 1 は、NO. 1 のスペクトル形状になり、充填シース自励波 2 0 1 は、NO. 2 のスペクトル形状になり、鉄筋経路波 2 0 2 は、NO. 3 のスペクトル形状になり、直接波 2 0 3、表面波 2 0 4 は、NO. 6 のスペクトル形状になる。分析で用いるシース自励振動波を図 2 9 に示す。

30

【 0 1 2 2 】

図 2 9 の計測は、発信探触子 1 1 1 と受信探触子 1 1 2 の間隔 a を、図 2 7 のシース直上のコンクリート表層配筋ピッチ a_p の整数倍とすることで、発信探触子 1 1 1、受信探触子 1 1 2 がコンクリート表層配筋直上とならない様に配慮している。

40

一般のコンクリート構造物の設計慣習として a_p 値は 1 2 5 mm、2 5 0 mm ($2 \times 1 2 5$) のいずれかとなることが多い。これより、図 2 9 の探触子配置間隔は $a = n \times a_p$ ($n = 2, 3, 4$) としている。既設 PC 橋梁での多数の計測事例によれば、最適値として、 $a = 3 \times 1 2 5 = 3 7 5$ mm、 $a = 4 \times 1 2 5 = 5 0 0$ mm のいずれかとするのが良いと判断している。

【 0 1 2 3 】

また、分析で採用する波種は、P 波 (たて波)、S 波 (よこ波) のいずれでも良い。

計測対象シースによっては、図 2 9 のシース自励振動伝達波において、P 波の上に探査

50

妨害波がより多く重畳する場合、又はS波の上に探查妨害波がより多く重畳する場合がある。個々の計測対象シースで、P波又はS波分析のいずれとするかの判断は充填又は空（不足含む）の判断がより明確になる分析結果を示す波種とすればよい。なお、充填か空（不足含む）の判断は上述の「かぶり厚の深い（150mm以上）細径薄鋼シースの充填有無探査」の場合と同様（図21参照）である。

【0124】

なお、自励波抽出による図21を得る分析でも、現象A及び現象Bを利用して、図21のスペクトル図を明瞭に抽出することになる。

ところで、図28の本計測受信波より楕円印で囲むシース自励振動波起生帯域を切り出す時（起生時刻） t_h 及び切り出し幅 t_a の設定が重要である。

10

【0125】

t_h は「数1」及び「数2」で特定できる（ここで d_s ：シース芯かぶり厚、 a ：探触子間隔、 v_p ：コンクリートたて波音速、 $\epsilon_1 = 0.6$ ：よこ波/たて波音速比）。

【0126】

【数1】

シース自励波(たて波)起生時刻

$$t_h \approx 2ds/v_p + a/v_p$$

【0127】

20

【数2】

シース自励波(よこ波)起生時刻

$$t_h \approx ds/v_p + (ds+a)/(\epsilon_1 \cdot v_p)$$

【0128】

ここから、探触子間隔 a の最適化による誤計測の回避について説明する。

前記までの計測分析法で充填シースを空シースと誤計測する場合もある。

計測対象シースで得る、シースかぶり深さが浅く、又は深い場合の加算平均波より抽出した分析対象波（シース反射波、シース自励波）の、シース充填時のスペクトルの一般的形状を図30(a)に示す。

30

【0129】

ところが、シース前方のコンクリート表層配筋が密配筋、後記図39に示す様にシースが配筋に対して傾いている、微細ヘアクラック、シース近傍に鉄筋又は支持金具等々が存在するなどの要因（以下、「探查妨害要因」という。）で、図30(b)の様なFFTスペクトル形状となる場合がある。

【0130】

鉄筋等からの反射波及び伝達波は、図30(a)に示すように、 $f_{D1} \sim f_{D2}$ 帯域で、そのスペクトル値が大きくなるが、前記探查妨害要素の存在で、前記 $f_{D1} \sim f_{D2}$ 帯域が $\tilde{f}_{D1} \sim \tilde{f}_{D2}$ のように広い帯域に変化してくる。これが原因し、充填シースを空シースと誤計測する。

40

【0131】

このような現象を回避する手段の1つに、探触子間隔 a を広くする方法がある。

この対処で図30(b)の様なFFTスペクトル形状であったものでも、図30(a)のFFTスペクトル形状の、シース反射波又はシース自励波スペクトルを抽出することができる。具体的計測分析例は以下で記述する。

【0132】

明細記述の分析結果、具体的には、前記FA(f)、FB(f)の表示は特記なき限り、最大エントロピー法スペクトル（以後、MEM表示という）とする。FFTスペクトル表示は特記する。

50

【 0 1 3 3 】

かぶり厚の深い (1 5 0 m m 以上) 細径薄鋼シースの充填有無探査について説明する。

既設 P C 橋梁の側面及び断面図の一例を図 3 1 に示す。

既設 P C 橋梁には種々のシースがコンクリート内に埋め込まれ、シースに内装された鋼棒又は鋼より線を強力に緊張した後、シース内にセメントミルク等が充填されている。これ等シースのコンクリート表面からの充填有無の探査例として、図 3 2 に示すかぶり厚の深い鉛直シースを取り上げる。

【 0 1 3 4 】

図 3 2 に示す側壁 (厚さ 3 6 0 m m) には鉛直シースが多数埋め込まれている。また、10
複数の主ケーブルシースも埋め込まれている。

鉛直シースの充填有無探査の場合、一对の発信探触子 1 1 1 及び受信探触子 1 1 2 を図示するように鉛直シース直上コンクリート面に所定の間隔 a として配する計測となる。さらに探触子配置位置を図示するように鉄筋及び主ケーブル埋設位置から可能な限り離し $N o . 1, 2 \dots 4$ に示すように前記 a を一定にしたまま多点での計測を行い、それぞれ、受信波 $G_j(t)$ を収録し、加算平均波を作成する。

説明を容易にするために、空と判明しているシースと空か充填か不明のシースで図 3 2 の計測を行うことを考える。

【 0 1 3 5 】

図 3 3 は探触子間隔 $a = 1 2 5 m m$ として得た空シース計測の加算平均波 ($N o . 0$)
、探査対象シースの個々の受信波 ($N o . 1 \sim N o . 4$)、 $N o . 1 \sim N o . 4$ の加算平均波 ($N o . 5$) を並べて示したものである。コンクリート音速 $V = 4 0 6 5 m / 秒$ であり、シース反射波起生時刻はカーソル位置 ($t_h = 8 0 . 8 \mu 秒$ 、シース芯かぶり厚さ $1 8 c m$ 、径 $3 8 m m$: t_h は後述の [数 4] で演算) である。図 3 3 は、空と判っているシースの加算平均波 $G(t)$ と、計測対象シースの受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim 4$) と、 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim 4$) の加算平均波 $G(t)$ を並べて示したものである。この比較図からは充填の有無はなんら解らない。20

【 0 1 3 6 】

$f_k = 5 0 k H z$ とする $A(f) \sin$ 関数 ($f = 0 . 0$ で $0 . 0$ 、 $f = f_k$ で $1 . 0$ 、 $f = 2 f_k$ で $0 . 0$) を用い、 $A^{n_1}(f)$ ($n_1 = 1$ とした) を前記 $G(t)$
(空シースの加算波)、 $G_j(t)$ (計測対象シース受信波)、 $G(t)$ (計測対象シース加算平均波) の並びに対応するスペクトル群に、図 2 4 に示す様に乘じ、得られたスペクトル群の各々に対応する時系列をフーリエの逆変換で $GA(t)$ (空シース)、 $GA_j(t)$ (計測対象波)、 $GA(t)$ (計測対象波の加算) として求め、これ等の時系列波から図 1 8 に示す $TGC(t)$ 台形関数を用いて $t_h = 8 0 . 8 \mu 秒$; $t_a = 6 5 \mu 秒$ として、シースたて波反射波 $GB(t)$ (空シース)、 $GB_j(t)$ (計測対象波)、 $GB(t)$ ($GB_j(t)$ の加算平均波) を切り出し $0 \sim 8 0 k H z$ 帯域で最大エントロピー法スペクトルを比較表示したものである。 $f_k = 4 0 k H z$ に空と判っているシースの加算平均波 $GB(t)$ でのシース反射波スペクトル $FB(f)$ が生じている。また、計測対象シースの加算平均波 $GB(t)$ によるシース反射波スペクトル $FB(f)$ が $f_s = 2 0$
 $k H z$ 付近に生じている。前記図 2 1 を用いた記述によれば計測対象シースが充填シースと判断できる。30
40

【 0 1 3 7 】

なお、 $N o . 1 \sim N o . 4$ の探査対象シースの個々のスペクトル $FA(f)$ では $6 0 k H z \sim 8 0 k H z$ の帯域に大きなスペクトルが生じているが加算平均波のスペクトル $FA(f)$ (太線) ではこの帯域のスペクトルが消滅している。

これは個々の受信波の $6 0 k H z \sim 8 0 k H z$ 帯域のスペクトルに対応する時系列の位相情報が異なっていれば生ずる現象である。個々の受信波に含まれる鉄筋及び主ケーブルその他の探査妨害波はそれぞれ位相が大きく変動していることより $6 0 k H z \sim 8 0 k H z$ 帯域のスペクトルはこの探査妨害波の存在で生じたものと判断できる。50

【 0 1 3 8 】

ところで、前記 T G C 関数は台形関数に限定されない事を前記した。図 3 5 に図示する \sin 形状関数を用いた場合を示す。図 3 4 と図 3 5 で、ほとんど同一の分析結果となっていることが確認できる。

【 0 1 3 9 】

ところで、図 1 4 のかぶり深いシースの充填探査の場合、分析対象波として、シースたて波 (P 波) 反射波、シースよこ波 (M_1 波) の 2 種類があることを前記した。図 3 4、図 3 5 は、シースたて波 (P 波) を用いたものである。この計測事例の場合、かぶり厚がシース芯で 1 8 c m という事より、たて波反射波とよこ波反射波の起生時刻に大きな差がなく、この 2 つの波が時間軸上で重畳し、 M_1 反射波による分析の正当性を示すことができない。

10

シースかぶり厚が 2 5 c m と、さらに深い前記現象 C が存在する計測事例を用いて、 M_1 波による分析の正当性を示す。

【 0 1 4 0 】

図 3 6、図 3 7 は図 1 4 のコンクリート表層配筋ピッチ a_p が 1 0 0 m m と狭い場合の分析結果である。探触子間隔 $a = 2 5 0$ m m とし、若干探触子面が前記配筋直上コンクリート面となる計測事例である。

No . 1、No . 3 が空シース、No . 2 が充填シースである。

分析の手順は No . 1 ~ No . 3 のシース毎に、図 1 4 の計測で $G_1 (t) \sim G_4 (t)$ の 4 受信波を計測し、各シース毎に

20

【 0 1 4 1 】

【 数 3 】

$$G(t) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n G_j(t)$$

を $n = 4$ として作成した後、対応するスペクトル $F (f)$ を求め、空シースを充填シースと誤計測する頻度を低減するために、前記 $A_2 (f)$ 関数 ($f_k = 4 8$ k H z) を用いて、 $FA (f) = A_2 (f) \cdot F (f)$ 計算し、対応する時系列 $GA (t)$ よりシース反射波起生時刻 t_h 及び切り出し幅 t_a とする台形関数を用いて $GB (t)$ 波を抽出し、対応するスペクトルを $FB (f)$ として求めている。本計測事例の $GB (t)$ 波切り出しの t_h は探触子間隔 $a = 2 5 0$ m m、シースかぶり厚 (芯) 2 5 0 m m、探触子径 $\phi = 7 6$ m m、コンクリート音色 $V_p = 4 5 0 0$ m / 秒 (4 . 5 m m / μ 秒) を用いて [数 4]、[数 5] で求めている。シース反射波 (P 波) の t_h は、

30

【 0 1 4 2 】

【 数 4 】

$$t_h \approx 2 \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(ds - \frac{\phi}{2}\right)^2} / V_p$$

40

シース反射波 (M_1 波) の t_h は (: シース径)、

【 0 1 4 3 】

【 数 5 】

$$t_h \approx \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(ds - \frac{\phi}{2}\right)^2} / V_p + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(ds - \frac{\phi}{2}\right)^2} / V_s$$

50

としている。

また、シース反射波切り出し幅をP波切り出し、 M_1 波切り出し共に $t_a = 45 \mu\text{秒}$ とした。

【0144】

図36のP波分析、図37の M_1 波分析共、空シース(No.1、No.3)を空、充填シース(No.2)を充填と探査している。

本計測分析モデルはコンクリート強度が $40 \sim 45 \text{ N/mm}^2$ と高く、コンクリート打設1ヶ月ということより、P波分析で $f_k = 48 \text{ kHz}$ と高振動数となっている。また、 M_1 波分析では、 f_k がさらに高振動数側に移動している。

【0145】

次に、かぶり厚の浅い(150mm以下)細径薄鋼シースの充填有無探査を説明する。

図15、図27に示すシース自励波を用いた探査法である。既設PC橋梁の桁主ケーブルシースでの探査例を示す。

図38は計測対象既設PC橋梁の側面、平面、断面図である、同図3段目矩形印で囲む構造桁の配筋及び主ケーブル配置状況を同図1段目楕円印部分で図39に示す。

【0146】

本計測例はシースかぶり深さ d_s (コンクリート面とシース表面との距離) が 80 mm と浅い事より図15に示すシース自励波を分析対象波とすることになる。コンクリートたて波音速 V_p は 4300 m/秒 、シース径は 40 mm 、コンクリート厚 $d_w = 340 \text{ mm}$ 、探触子間隔 $a = 375 \text{ mm}$ とした本計測対象の場合の受信波の事例を図40に示す。No.1~No.4が多点計測の各受信波 $G_j(t)$ でありNo.5がこれ等受信波の加算平均波 $G(t)$ である。

【0147】

まず、これら受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim 4$) に対応するスペクトル $F_j(f)$ と加算平均波 $G(t)$ に対応するスペクトル $F(f)$ に、図24に示す $A_1(f)$ フィルタ関数 ($f_k = 39 \text{ kHz}$) を乗じて、 $FA_j(f)$ 、 $FA(f)$ を求め、対応する時系列 $GA_j(t)$ 、 $GA(t)$ を求めるという現象Cに対処する処理を行った後、TGC関数を前記 $GA_j(t)$ 、 $GA(t)$ に乗じて自励波 $GB_j(t)$ 、 $GB(t)$ を抽出し、対応するスペクトルをそれぞれ $FB_j(f)$ 、 $FB(f)$ として求めた。なお、TGC関数の係数 t_h はシース自励波の起生時刻とした。また、他の係数 t_a は、 $t_a = 52 \mu\text{秒}$ とした。

【0148】

シース自励波の起生時刻はたて波の場合、[数1]で、
 $t_h = 2 \times 80 / 4.3 + 375 / 4.3 = 124.4 \mu\text{秒}$
 よこ波の場合、[数2]で、よこ波/たて波音速比 γ_1 を 0.6 として、
 $t_h = 80 / 4.3 + (80 / 4.3 + 375 / 4.3) / 0.6 = 195 \mu\text{秒}$ となる。

【0149】

図41(a)は t_h を[数1]のたて波とした場合であり、図41(b)は t_h を[数2]のよこ波とした場合である。

本計測シースは削孔により充填と判明している。図21の充填及び空シーススペクトルの対比によれば、図41(a)のたて波自励波分析は正解、図41(b)のよこ波自励波分析は誤計測している。この誤計測が生ずる理由はコンクリート版厚に関する反射波が $t_h \sim t_h + t_a$ の中に混入したことが原因している評価は後述する。

【0150】

さらに、他の分析事例を図42に示す。採用したTGC関数は図示する \sin 形状関数であるが処理手順は図41を得たのと全く同一である。図42(a)は t_h がたて波の場合であり、図42(b)は t_h がよこ波の場合である。

図42(a)のたて波自励波分析、図42(b)のよこ波自励波分析共、各受信波及び加算平均波で $f_k = 40 \text{ kHz}$ 前後にスペクトルが生じている。

10

20

30

40

50

【 0 1 5 1 】

前記図 2 1 に関する記述によればこの計測対象シースは空と判断できる。

さらに、本分析で用いるパラメータ t_a の値は 100μ 秒とした。

【 0 1 5 2 】

次に、自励波分析での探触子間隔 a を広くすれば鉄筋伝達波等の存在による誤計測を回避できることを説明する。

シースかぶり深さ $d_s = 90 \text{ mm}$ 、薄鋼シース径 $= 40 \text{ mm}$ 、鉄筋ピッチ @ 100 、@ 250 の図 4 3 (図 1 5 参照) の計測で得る受信波を用いてシース自励波の卓越スペクトルの有無を分析する方法を用いて説明する。

【 0 1 5 3 】

探触子間隔 $a = 250 \text{ mm}$ 、振動子径 $= 76 \text{ mm}$ として、削孔で充填と確認されているシースの図 4 3 の計測で得た受信波 $G_j(t)$ 4 本とこれの加算平均波 $G(t)$ に対応するスペクトル $F_j(f)$ 、 $F(f)$ に前記振動数関数 $A_1(f)$ を乗じ $FA_j(f)$ 、 $FA(f)$ を求め、この $FA_j(f)$ 、 $FA(f)$ に対応する時系列を $GA_j(t)$ 、 $GA(t)$ として求め、この $GA_j(t)$ 、 $GA(t)$ に [数 2] で算定されるよこ波の $t_h (= 90 / 4.3 + (90 + 250) / (0.6 \times 4.3) = 153 \mu$ 秒) を指標に定義される \sin 形状関数 $TGC(t)$ を乗じシース自励波 $GB_j(t)$ 、 $GB(t)$ を抽出し、この抽出波の各々のスペクトル $FB_j(f)$ 、 $FB(f)$ を求め、 $GB^{n^2}_j(t)$ 、 $GB^{n^2}(t)$ 及び対応する最大エントロピー法スペクトル $FB^{n^2}_j(f)$ 、 $FB^{n^2}(f)$ を $n^2 = 2$ として図 4 4 に比較表示している (n^2 は 1 以上の整数であり、波形又はスペクトルを誇張するためのべき数である。)。

【 0 1 5 4 】

$FB^{n^2}_j(f)$ スペクトルが、 $40 \text{ kHz} \sim 65 \text{ kHz}$ に生じている。加えて、その加算平均波より抽出した $FB^{n^2}_j(f)$ でも $f_k = 40 \text{ kHz}$ 付近にスペクトルの起生を確認できる。この計測対象シース (充填) を空又は充填不足シースと誤分析している。ところで、前記 $40 \text{ kHz} \sim 65 \text{ kHz}$ の $FB^{n^2}_j(f)$ スペクトルは図 3 0 (b) に示す $f_{D1} \sim f_{D2}$ 帯域のスペクトルが、前記探査妨害要因で $f_{D1} \sim f_{D2}$ 帯域に広く分布したためである (表層の鉄筋経路波スペクトルが探触子間隔が狭いと大きくなる)。

【 0 1 5 5 】

一方、図 4 5 は探触子間隔 $a = 375 \text{ mm}$ として、同一の分析を行ったものである。但し、探触子間隔 $a = 250$ から 375 に変化した分、[数 2] で算定されるよこ波の t_h が異なった値となる。

$t_h = 90 / 4.3 + (90 + 375) / 0.6 \times 4.3 = 180.2 \mu$ 秒を指標に $GB^{n^2}_j(t)$ 、 $GB^{n^2}(t)$ 及び対応する最大エントロピー法スペクトル $FB^{n^2}_j(f)$ 、 $FB^{n^2}(f)$ を $n^2 = 2$ として比較表示している。

【 0 1 5 6 】

探触子間隔 a を広くした ($a = 375 \text{ mm}$) の計測分析結果では、 $f_k = 40 \text{ kHz}$ 前後のスペクトルは消滅し、充填シースと正しく分析している。

【 0 1 5 7 】

次に、シース自励波の存在に関する検証について説明する。

前記までの論述で、シース自励振動によりシース廻りコンクリートをシース長手方向へ伝達する波を利用してシース充填有無探査が行えることを示した。この様な波の存在は従来の波の伝達理論では証明されていない。

【 0 1 5 8 】

この点に関して論述する。

若し、計測対象シースが空シースである時、自励振動波が存在するとすれば、図 1 5 の自励振動波計測の探触子間隔 a を変えた受信波 (加算波) で自励波抽出結果を比較すれば概略同一形状のスペクトルを得るはずである。以下、検討する。

【 0 1 5 9 】

10

20

30

40

50

図46は、かぶり(芯)100mmの60mm鋼製シースの分析例である。コンクリート表層配筋ピッチ a_p は100mm、コンクリート音速 $V = 4600$ m/秒である。

No.1の充填シース, No.2~No.4の空シースの計測対象シース毎に、多点計測受信波(4点計測)の加算平均波を並べて、その各々について自励波を台形関数($t_a = 55$ μ 秒)を用いてよこ波自励波を切り出している。上段は探触子間隔 $a = 375$ mm、下段は探触子間隔 $a = 500$ mmの場合のFFTスペクトルである。

【0160】

$a = 375$ mmの場合のよこ波自励波の t_h は[数2]で $t_h(a = 375 \text{ mm}) = 212$ μ 秒となる。自励波の1波目は振幅が小さいことを考慮して、

$f_k = 40$ kHzが一波 $10^6 / (40 \times 10^3) = 25$ μ 秒より、一波後方の $t_h(a = 375 \text{ mm}) = 212 + 25 = 237$ μ 秒を始点として、自励波(よこ波)を抽出している。

10

【0161】

一方、下段の探触子間隔 $a = 500$ mmの加算波並列示では、探触子間隔 a の差分 a が $a = 500 - 375 = 125$ mmとなることより、 $V_p = 4600$ m/秒を用いて、 $t_h(a = 500 \text{ mm}) = 237 + 125 / (0.6 \times 4.6) = 282$ μ 秒を始点として、よこ波自励波を抽出している。

【0162】

FFTスペクトル形状がよく似ている。No.2、3、4が空シース、No.1が充填シースである。この様に、 $a = 375$ mm及び、 $a = 500$ mmの双方で、自励波起生時刻帯域の時系列のFFTスペクトルが極めて良く相似している。分析結果として示さないが、自励振動波以外の時系列の切り出しではこの様な相似は見いだせない。

20

この現象は、空シースで生ずる自励波がシース廻りコンクリートをシース長手方向へ伝達することを示すものと判断する。

【0163】

図16に示すシース前方の鉄筋反射波102、シース支承鉄筋等の反射波102、コンクリート内微細割れ反射波103、表面波104、及び図27に示すシース前方鉄筋伝達波202、コンクリート表層を浅く伝達する直接波203及び表面波204などの探査妨害波を、前記現象Aを利用して除去低減し、かつ現象Bを利用するとき、現象Cで生ずる f_k スペクトルの縮小に対処することで、シース反射波又はシース自励波の卓越振動数 f_s 、 f_k のスペクトルを求めることができ、計測対象シースの充填有無が反射波分析又は自励波分析で高精度に行えることを、ここまでの説明で詳述した。

30

【0164】

しかしながら、本発明は、既設PC橋梁の各コンクリート構造部位に埋め込まれたシースの充填有無探査を目的とするものである、その種類は多岐に亘る。

例えば、図4に示す床版主ケーブルシース、図31に示す箱桁のウェブ(側壁)の側壁内主ケーブルシース、図32に示す箱桁のウェブ(側壁)の鉛直シース及び図38に示す桁梁の主ケーブルシース(図39参照)などである。これらのシースの計測を図5に示している。

【0165】

40

各コンクリート構造部位においては受信波の中に前記探査妨害波に加え、そのコンクリート形状特有の探査妨害波が生ずる。

また、図5の桁及びウェブ主ケーブルシース横計測及び桁フランジ下面計測のシース多段配置では計測対象シース反射波又は自励波の上に、それより深い位置にあるシースの反射波又は自励波が重畳する。

【0166】

これらの問題に対処しなければ、誤計測の頻度が増大する。前述の説明に記述した対処に加え、この問題にも対処する装置、方法を整理して説明する。

説明を簡単にするために、鉄筋等による妨害波のない図47の無筋コンクリート(強度 45 N/mm^2)に埋め込まれたシースの充填有無探査を考える。

50

【 0 1 6 7 】

まず、シー反射波抽出による方法（請求項 2、3 の記述に関連する）について、シー埋め込み純かぶり厚 $d_s = 170 \text{ mm}$ として説明する（図 47 参照）。

このコンクリート形状によれば、コンクリート表面を伝達する波として探触子間を伝達する P_1 （たて波）及び、 S_1 （よこ波）、コンクリート端面からの反射波 P_2 （たて波）及び、 S_2 （よこ波）がある。

【 0 1 6 8 】

特殊な波として、往路を S_2 （よこ波）、復路をたて波として受信する端面反射 $S_2 | M_1$ 波がある。シー反射波としては P 波以外に M_1 波（ $d_s | M_1$ ）、 M_2 波（ $d_s | M_2$ ）が存在する。

図 48 は、図 47 の無筋コンクリートモデルで 301 のシーが埋め込まれていない場合、302、303、304、305 はシーが埋め込まれた場合で 302、305 がシー内充填が不完全で下側に空隙があり、303 がシー内が空であり、304 がシー内が完全に充填されているそれぞれのシーの加算平均波 $G_i(t)$ ： $i = 1 \sim 5$ を重ね描きしたものである。これら加算平均波は図 14 に示す計測で $a = 200$ 、 $a = 100$ （図 14 参照）として計測した各々 4 つの受信波を加算平均したものである。添字 i は、計測モデル番号ということになる。

【 0 1 6 9 】

たてカーソルで、図 47 に示すコンクリート形状で生ずる波の起生時刻を、 P_1 、 S_1 、 P_2 、 S_2 、 $S_2 | M_1$ 、版厚反射 $d_w | P$ 毎に表記している。

また、図 14 に示すシー反射波 $d_s | P$ 、 $d_s | M_1$ 、 $d_s | M_2$ も表記している。

【 0 1 7 0 】

これらの波の起生時刻は [数 6] ~ [数 13]、[数 16] で、探触子間隔 $a = 200 \text{ mm}$ 、モデル幅 $b = 400 \text{ mm}$ 、コンクリートたて波音速 $V_p = 4350 \text{ m/秒}$ 、シー純かぶり厚は $d_s = 170 \text{ mm}$ 、版厚 $d_w = 300 \text{ mm}$ 、探触子振動子径 $\phi = 76 \text{ mm}$ を用いて算定している（図 47 参照）。

【 0 1 7 1 】

【数 6】

P_1 波起生時刻

$$t[P_1] = a / V_p \approx 45.9 \mu\text{秒}$$

30

【 0 1 7 2 】

【数 7】

S_1 波起生時刻

$$t[S_1] = a / (0.6V_p) = 76.5 \mu\text{秒}$$

【 0 1 7 3 】

【数 8】

P_2 波起生時刻

$$t[P_2] = 2 \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b^2} / V_p = 102.8 \mu\text{秒}$$

40

【 0 1 7 4 】

【数 9】

S₂波起生時刻

$$t[S_2] = 2 \times \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + b_1^2} / (0.6V_p) = 171.3 \mu\text{秒}$$

【0175】

【数10】

S₂|M₁波起生時刻

$$t[S_2|M_1] \approx b_1 / (0.6V_p) + \sqrt{a^2 + b_1^2} / V_p \approx 128.0 \mu\text{秒}$$

10

【0176】

【数11】

シース反射P波

$$t[ds|P] = t_h = 2 \sqrt{\left(\frac{a-\phi}{2}\right)^2 + ds^2} / V_p \approx 83.3 \mu\text{秒}$$

20

 ϕ : 振動子径76mm

【数11】は、【数4】に対応する数式だが【数4】ではシースかぶり厚をコンクリート面 - シース中心としている。以降の説明ではシース中心でなくシース表面としている。

また、シースまわり伝達長を a から a - ϕ に修正している。

【0177】

【数12】

シース反射M₁波

$$t[ds|M_1] \approx \frac{t_h}{2} (1 + 1/0.6) \approx 111.1 \mu\text{秒}$$

30

【数12】は、【数5】に対応する数式だが、以降の説明を容易にするため計算式の表現を変更している。

【0178】

【数13】

シース反射M₂波 (往路、復路共よこ波)

$$t[ds|M_2] = t_h / 0.6 \approx 138.8 \mu\text{秒}$$

40

【0179】

【数 1 4】

シーブ自励 P 波

$$t_h[ds|自P] = (a + 2ds) / \beta \cdot V_p$$

【数 1】では $\beta = 1.0$ としているが、自励 P 波は P 波より若干遅くなる。
多くの計測例で $\beta = 0.86$ 前後と特定した。

【0 1 8 0】

【数 1 5】

10

シーブ自励 S 波

$$t_h[ds|自S] = ds / V_p + (ds + a) / 0.6V_p$$

【0 1 8 1】

【数 1 6】

$$t[dw|P] = 2\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / V_p$$

20

【0 1 8 2】

【数 1 7】

$$t[dw|M_1] \approx \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / V_p + \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / 0.6V_p$$

【0 1 8 3】

30

【数 1 8】

$$t[dw|M_2] = 2\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + dw^2} / 0.6V_p$$

【0 1 8 4】

【数 1 9】

$$t[dc|P] = 2\sqrt{b_1^2 + dw^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} / V_p$$

40

【0 1 8 5】

【数20】

$$t[dc|M_1] \approx \sqrt{b_1^2 + dw^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} / V_p + \sqrt{b_1^2 + dw^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} / 0.6V_p$$

【0186】

【数21】

$$t[dc|M_2] = 2\sqrt{b_1^2 + dw^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} / 0.6V_p$$

10

計測対象シースの以遠シースからの反射波 [ds₂ | P], [ds₂ | M₁], [ds₂ | M₂] の起生時刻は、それぞれ [数11], [数12], [数13] で ds を以遠シースのかぶり厚 ds₂ に置き換えて算定すればよい。

【0187】

また、計測対象シースの以遠シースからの自励P波 [ds₂ | 自P]、自励S波 [ds₂ | 自S] の起生時刻は、それぞれ [数14], [数15] で ds を以遠シースのかぶり厚 ds₂ に置き換えて算定すればよい (図48 参照) 。

20

【0188】

以降の本モデルでの分析で用いる切り出し波を、図18の台形TGC(t)関数を用いた場合で説明する。

図48の加算平均波からシースたて波反射 [ds | P] の起生時刻 t_h = 83.3 μ秒を始点とし、終点を 113.3 μ秒とするTGC(t)関数 (t_h = 83.3 μ秒、t_a = 113.3 - 83.3 = 30 μ秒) を用いて充填有無分析用の時系列を切り出している。何故、もっと t_a 値を大きく、例えば版厚反射 dw | P 起生時刻手前とし、t_a = 55.5 μ秒程度とできないのだろうか。

【0189】

本コンクリートモデルの表面波で、側面反射 P₂, S₂ | M₁ 波の卓越振動数が空シース卓越振動数の f_k 値と概略同一となる物理現象 (後述する) があり、もし、図48の楕円印で囲む P₂ 後方波及び S₂ | M₁ 波を切り出し波に含めると、充填シースを空シースと誤計測する。

30

【0190】

この論旨によれば、P₂ 波もそのすべてを切り出し波から除き、t_a 値を P₂ 波の起生時刻 (102.8 μ秒) とシース反射波 ds | P の起生時刻 (t_h = 83.3 μ秒) との差で t_a = 102.8 - 83.3 = 20 μ秒程度とすべきである。但し、P₂, ds | P、又は、版厚反射波 dw | P などの探查妨害波の存在しない多くの他の計測例では空又は充填シースの卓越スペクトルをできるだけ明瞭に取出したいことより、経験値として可能な限り t_a 値を大きくし、t_a = 45 ~ 60 μ秒としている。

40

【0191】

これより、前記 P₂ 波の始めの1波の振幅が2波以降の振幅に比し小さいという現象と空シース卓越振動数が既設PC橋梁コンクリートで 40 ~ 60 kHz (1波の長さ 1000 / 40 ~ 1000 / 60 = 25 ~ 16.7 μ秒) という経験値を用い、P₂ 波の始めの半波程度 (時間長にして 10 μ秒前後) を切り出し波の中にも含めても、相対的にシース反射波 ds | P, ds | M₁ の振幅が大きい事より誤計測を回避できる。

【0192】

このような判断で、本充填有無分析で用いる t_a 値を t_a = (P₂ 起生時刻 - シース反射波 ds | P 起生時刻) + (40 ~ 45 kHz P₂ 波の半波の時間) = (102.8 - 83.3) + 10 = 29.5 ~ 30 μ秒とした。

50

【 0 1 9 3 】

まず、請求項 2 の記述に関連する分析法を説明する。

図 4 8 の個々の計測対象シースの加算平均波を $G_i(t)$ と表現し、302 を $G_1(t)$ 、303 を $G_2(t)$ 、304 を $G_3(t)$ 、305 を $G_4(t)$ とし、対応するスペクトルを $F_i(f)$ ($i = 1 \sim 4$) としたとき、振動数関数 $A(f)$ を、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f_k$ で 1.0 、 $f = 2f_k$ で 0 、と定義し、 f_k 値を低振動数から高振動数に徐々に大きくする都度 [数 2 2] から [数 2 5] の演算を繰り返し行う分析である。ここで n は 1 以上の整数である。本分析では $n = 1$ とした。

【 0 1 9 4 】

【 数 2 2 】

10

$$FA_i(f) = A^{n1}(f) \cdot F_i(f)$$

【 0 1 9 5 】

【 数 2 3 】

$$GA_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} FA_i(f) \cdot e^{i\omega t} df$$

を演算し、この後、前記 t_h 、 t_a 値で定義される図 1 8 に示す台形関数 $TGC(t_h, t_a)$ を用いて、

20

【 0 1 9 6 】

【 数 2 4 】

$$GB_i(t) = TGC(t_h, t_a) \cdot GA_i(t)$$

を計算し、対応するスペクトル $FB(f)$ を [数 2 5] で求める。

【 0 1 9 7 】

【 数 2 5 】

30

$$FB_i(f) = \int_{-\infty}^{\infty} GB_i(t) \cdot e^{-i\omega t} dt$$

具体的には $f_k = 1.0$ 又は 2.0 とし

【 0 1 9 8 】

【 数 2 6 】

$$\tilde{f}_k = \tilde{f}_k + \Delta f_k$$

40

の計算の都度 [数 2 2] ~ [数 2 5] の演算を繰り返し、この繰り返しの都度、得られる $GB_i(t)$ 、 $FB_i(f)$ を装置分析画面に $GB^n_i(t)$ 、 $FB^n_i(f)$ (n は 1 以上の整数) を表示し、これらの変化を視認し、 $FB_i(f)$ の最大エントロピー法スペクトルの変化の状況を、図 2 1 の (a) 空シーススペクトル、(b) 充填シーススペクトルと対比させ、計測対象シースが空 (充填不足含む) か充填かを判断できる。

【 0 1 9 9 】

図 4 9 に、前記 n を $n = 1$ として充填有無分析結果の推移を、離散的に $f_k = 40, 45, 50, 55$ kHz の場合で示す。

【 0 2 0 0 】

50

強度が 45 N/mm^2 と硬いコンクリート故、[表1]に示す f_s 、 f_k 値が $f_s = 27 \text{ kHz}$ 前後、 $f_k = 57 \text{ kHz}$ 前後と分析されている(図49参照)。

【0201】

次に請求項3の記述に関連する分析法を説明する。

前記加算平均波 $G_i(t)$ 、対応するスペクトル $F_i(f)$ を用いて説明する。

【0202】

図18の計測対象反射波切り出しの台形関数 $TGC(t)$ の係数を $t_h = 83.3 \mu\text{秒}$ 、 $t_a = 30 \mu\text{秒}$ として、前記 $G_i(t)$ に乗じて得る時系列を[数27]で求めると図50の如くなる。

【0203】

【数27】

$$GA_i(t) = TGC(t_h, t_a) \cdot G_i(t)$$

対応するスペクトルをフーリエ変換で[数28]で求める。

【0204】

【数28】

$$FA_i(f) = \int_{-\infty}^{\infty} GA_i(t) \cdot e^{-i\omega t} dt$$

この後、図24(a)に示す sin 形状関数 $A(f)$ (中心振動数 f_k) を 40 kHz から徐々に大きくする都度、[数29]、[数30]の演算を繰り返し行う。 sin 形状関数 $A(f)$ を、 $f = 0.0$ で 0.0 、 $f = f_k$ で 1.0 、 $f = 2f_k$ で 0 、と定義し、 $n1$ を 1 以上の整数として、

【0205】

【数29】

$$FB_i(f) = A(f)^{n1} \cdot FA_i(f)$$

【0206】

【数30】

$$GB_i(t) = TGC(t_h, t_a) \times \int_{-\infty}^{\infty} FB_i(f) \cdot e^{i\omega t} df$$

具体的には $f_k = 1.0$ 又は 2.0 とし

【0207】

【数26】

$$\tilde{f}_k = \tilde{f}_k + \Delta f_k$$

[数26]の f_k 増分の都度、[数29]、[数30]の演算で得る $FB_i(f)$ 、 $GB_i(t)$ を装置分析画面で視認し、 $FB_i(f)$ の最大エントロピー法スペクトル変化の状況を図21の(a)空シーススペクトル、(b)充填シーススペクトルと対比させ、計測対象シースが空(充填不足含む)か充填かを判断する。

【0208】

10

20

30

40

50

図5 1に、 $n_1 = 1$ としたときの充填有無分析結果の推移を離散的に $f_k = 40, 45, 50, 55$ kHz の場合で示す。無筋コンクリート故、 $f_{D1} \sim f_{D2}$ 間の鉄筋等によるスペクトルは全く生じていない。

【0209】

なお、請求項2に対応する図4 9、請求項3に対応する図5 1の分析の推移を詳述しておく。計測した各シース (i) 毎の加算平均波 $G_i(t)$ の並びで [数26] の f_k の初期値を 30 kHz とし、 $f_k = 1.0$ kHz とし $f_k = f_k + f_k$ の計算の都度 [数22] ~ [数25] の演算を繰り返している。

【0210】

前記繰り返し演算で得られる各シースの $FB_i(f)$ スペクトルを1以上の整数 n を1として、 $FB^n_i(f)$ を i に関する個々のスペクトル毎に、その最大スペクトルを最大表示するスペクトル比較表示を f_k が 60 kHz になるまで繰り返し行い、 $FB_i(f)$ スペクトルの変化の推移を確認できる最大エントロピー法スペクトル表示で 38 kHz 前後 ~ 65 kHz 前後の振動数帯のみにスペクトルが生じ、又は 38 kHz ~ 65 kHz、 15 kHz ~ 30 kHz の双方の振動数帯にスペクトルが生じ、又は 15 kHz ~ 30 kHz 振動数帯のみにスペクトルが生じる現象のいずれかが明確に視認できる f_k 値の $FB^n_i(f)$ の最大エントロピー法スペクトルで、 38 kHz ~ 65 kHz 振動数帯域に生ずるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k 、 15 kHz ~ 30 kHz 振動数帯域に生ずるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s とし、 $FB^n_i(f)$ の i 毎 (シース毎) に f_s 位置に中心振動数を持つ大きなスペクトルが有り、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが無い場合、計測対象シース内部に充填材が完全充填されたシースと判断し、 f_s 位置に中心振動数を持つスペクトルの有無に関係なく、 f_k 位置に中心振動数を持つスペクトルが有る場合、計測対象シース内部に充填材が充填されていない又は充填不足である不完全充填シースと判断している。

【0211】

図4 9、図5 1の分析で用いた $TGC(t)$ 関数は、図1 8に示す台形関数であるが、 \sin 形状関数、円弧形状関数であっても構わない。この場合の関数形状の1例が計測分析事例の図4 4、図4 5に示されているが、 $t = 0 \sim t_h$ で 0.0 、 $t = t_h + t_a/2$ で 1.0 、 $t = t_h + t_a$ で 0.0 としている。分析事例として示さないが、 \sin 形状関数又は円弧形状関数を用いた場合でも、図4 9、図5 1と概略同一の分析結果を得ることが出来る。

【0212】

ところで、図4 7に示す表面波 P_2 、 S_2 、 $S_2 | M_1$ 、版厚反射 $dw | P$ 、 $dw | M_1$ 、 $dw | M_2$ 、コーナ反射 $dc | P$ 、 $dc | M_1$ 、 $dc | M_2$ などは反射境界が自由端である。自由端からの反射波の卓越振動数は空シース反射波及び空シース自励振動波の卓越振動数 f_k の近傍に存在することが、本分析法確立研究の中での極めて多数の計測事例で確認されている。これより、充填有無分析用切り出し波 $GB_i(t)$ の中に、これ等表面波、版厚反射波、コーナ反射波などの探査妨害波が含まれると、充填シースを空シースと誤計測することになる。以上より、これ等妨害波が切り出し波の中に含まれない様に t_a の値を決める必要がある。

【0213】

図4 9を得たと同一の分析で、反射境界が自由端である P_2 の後方波と $S_2 | M_1$ の混合波 (印で囲った時系列) 及び 30 cm 版厚の $dw | P$ 波の抽出によるスペクトル振動数が f_k 近傍に生ずる事を、図4 9を得た $f_k = 55$ kHz の場合で図5 2に示す。

【0214】

P_2 の後方波 + $S_2 | M_1$ の混合波は図5 2 (a) で 59 kHz、 30 cm 版厚 P 波 ($dw | P$) は図5 2 (b) で 70 kHz となっている。自由端からの反射波が卓越振動数 f_k の近傍に存在するという1つの事例である。

【0215】

10

20

30

40

50

なお、図49、図51の分析例は $FB(f)$ 、 $GB(t)$ の添字を i (計測シース番号)としている。既設橋梁のシースでは、シースかぶり厚がそれぞれ異なることが多いことより、請求項2、3ではこの添字を j ($j = 1 \sim nw - 1$ を受信波、 $j = nw$ を加算平均波)としている。

【0216】

次に請求項4の記述に関連する分析法を説明する。

探触子間隔 a を広くして図15の計測で得る計測対象シースの受信波($G_j(t)$ ($j = 1 \sim nw - 1$ 、 $nw - 1$ は受信波の数))とこれ等 $G_j(t)$ の加算平均波 $G_{j = nw}(t)$ を並列に表示し、 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim nw - 1$)をフーリエ変換して求めた $F_j(f)$ を重ね描きした分析用画面を用いて、シース廻りのコンクリートをシース長手方向に伝達する自励振動たて波、又は自励振動たて波とよこ波の混合波、又は自励振動よこ波を $G_j(t)$ から $TGC(t)$ 時刻関数を用いて抽出し、この抽出波を周波数分析することで計測対象シース自励振動波の卓越振動数を特定し、計測対象シース内に充填材が充填不足(未充填含む)か、完全充填かを判断するものである。

10

【0217】

この分析で、前記分析を阻害する探査妨害波は版厚反射($dw|P$ 波、 $dw|M_1$ 波、 $dw|M_2$ 波)、コーナ反射($dc|P$ 波、 $dc|M_1$ 波、 $dc|M_2$ 波)、計測対象シースの以遠シースからの反射波($ds_2|P$ 波、 $ds_2|M_1$ 波、 $ds_2|M_2$ 波)、計測対象シースの以遠シース自励 P 波と自励 S 波、コンクリート表面波で端面からの反射波(P_2 波、 $S_2|M_1$ 波、 S_2 波)である。

20

【0218】

これ等妨害波の起生状況について図47を用いて説明する。シース埋め込み深さ $ds = 70\text{mm}$ とした時の充填有無の不明な4つのシース埋め込みモデルの受信波を重ねて図53、図54に示す。

【0219】

図53は探触子間隔 $a = 500\text{mm}$ 、図54は探触子間隔 $a = 375\text{mm}$ の場合である。

探触子間隔 $a = 500\text{mm}$ とした図53に示す受信波表示の上に、前記探査妨害波の版厚反射波($dw|M_1$ 、 $dw|M_2$)の起生時刻を[数17]~[数18]で算定し、及びコンクリート表面波で端部からの反射波(P_2 、 $S_2|M_1$ 、 S_2)の起生時刻を[数8]~[数10]で算定し、たてカーソルでその時刻位置を示している。

30

【0220】

また、[数7]で算定したコンクリート表面を1対の探触子間で伝達する S_1 波と[数14]で算定したシース自励振動 P 波($ds|自P$)も、その起生時刻をカーソルで示している。本計測例の場合、自励 P 波($ds|自P$)の振幅が大きい時間軸帯として自励 P 波の起生時刻($171\mu\text{s}$)を始点とし、版厚反射 $dw|M_1$ の起生時刻($239\mu\text{s}$)を終点とする時間幅 $68\mu\text{s}$ の波を抽出し、この抽出波を充填有無分析の対象時系列としている。この時間帯には前記妨害波の版厚反射波 $dw|M_1$ 、 $dw|M_2$ 及びコンクリート表面波で端部からの反射波 S_2 は存在しない。

40

【0221】

次に請求項6に関連する内容を説明する。

この時間帯には探査妨害波の1つコンクリート表面波の端部反射波($S_2|M_1$)が存在し、版厚反射 P 波($dw|P$)の後方継続波、コンクリート表面波の端部からの反射波 P_2 波の後方継続波が混入する。これ等の波は前記した如く、前記 f_k 近傍の卓越振動数を持つが、探触子間隔 a が大きくなると加速度的に(a の2乗に逆比例して)小さくなる。

【0222】

この現象を利用すると $a = 500\text{mm}$ でのシース充填有無計測では分析対象とする時系列を $t = t_h$ ($171\mu\text{s}$)から版厚 M_1 波($dw|M_1$)の起生時刻までとし、前記 $dw|P$ の後方継続波、 P_2 波の後方継続波が混入しても、これ等の波の振幅が小さい事よ

50

り誤ることなくシース内充填の有無を探查できる。

【0223】

反射面を自由端（空気層）とする版厚反射波（ P 、 M_1 、 M_2 ）を事例に、 a 値の変化による卓越振動数波の振幅の変化を模式的に図55に示す。

図56の既設PC橋梁の桁梁下部フランジの下面計測で、シースの充填有無計測を行った結果について説明する。

【0224】

図57(a)、図57(b)はシースNo.1の分析結果である。前記図49を得た分析とまったく同一の演算手順で求めたものである。図15の計測で $a = 500\text{ mm}$ 、 $a = 30\text{ mm}$ の多点計測で受信波 $G_j(t)$ ($j = 1 \sim n_w - 1$)を受信し、これ等の加算平均波 $G_{j = n_w}(t)$ を求め、これを並列表示して分析している。但し、図49はシース反射波の切り出しであったが、本計測例は自励振動波の切り出しである。

10

【0225】

これより、図57(a)の自励振動P波分析では、TGC(t)関数の t_h 値をシースかぶり厚 $d_s = 70\text{ mm}$ 、 $b_1 = 125\text{ mm}$ 、 $a = 500\text{ mm}$ 、コンクリート音速 $V_p = 4770\text{ m/秒}$ として[数14]を用いて $t_h = 156\text{ }\mu\text{秒}$ とし、探查妨害波を[数9]を用いて $t[S_2] = 198.2\text{ }\mu\text{秒}$ 、[数10]を用いて $t[S_2 | M_1] = 155\text{ }\mu\text{秒}$ で算定し、 $t[S_2]$ と t_h の差分値(= $198.2 - 125 = 73\text{ }\mu\text{秒}$)より小さい値として $t_a = 40\text{ }\mu\text{秒}$ と設定した。

【0226】

20

$S_2 | M_1$ 波が本例では、 $t_h \sim t_h + t_a$ の時間帯に生ずるが、 a 値が 500 mm と広い事、計測面が風雨にさらされ、その振幅が小さくなっていること及びコンクリート形状より版厚、コーナ反射等が存在しない事より、この時間帯の波の卓越振動数の特定で、充填有無探查でシース内の充填有無状況を正しく分析している。

【0227】

さらに、図57(b)の自励振動S波分析ではTGC(t)関数の t_h 値を[数15]を用いて $t_h = 214\text{ }\mu\text{秒}$ とし、コンクリート表面波の $b - b_1 = 600 - 125 = 475\text{ mm}$ 、端面からの反射波 $[S_2 | M_1]$ 起生時刻を[数10]で b_1 値を $b - b_1$ 値(475 mm)に置き換えて、 $t[S_2 | M_1] = 315\text{ }\mu\text{秒}$ と計算し、 $t_a < t[S_2 | M_1] - t_h = 315 - 214 = 101\text{ }\mu\text{秒}$ より $t_a = 70\text{ }\mu\text{秒} - 101\text{ }\mu\text{秒}$ として求めたものである。

30

【0228】

この $t_h \sim t_h + t_a$ 時間帯には探查妨害波として前記 $t[S_2] = 198.2\text{ }\mu\text{秒}$ に起生するコンクリート端面よこ波反射があるが、 $a = 500\text{ mm}$ 及び風雨にさらされたコンクリート面という事もあり、その振幅は小さい。コンクリート面が長年月風雨にさらされると、コンクリート面を伝達する表面波の端部反射波 $[P_2]$ 、 $[S_2]$ 、 $[S_2 | M_1]$ は極めて小さくなり探查妨害波から除外できる(請求項7に関する記述である。)

これより、加算平均波 $FB_5(f)$ の卓越振動数が 20 kHz (f_s 値)に生じ、充填シースを充填と正しく分析している。

なお、前記数式の添字は計測対象シースNoの*i*だが、本説明では計測対象シースの多点受信波と加算波平均の並びを示す*j*で示している。

40

【0229】

図58(a)、(b)、(c)はNo.2シース($d_s = 70\text{ mm}$ 、 $b_1 = 250\text{ mm}$)の分析結果である。No.2(空)シースより深い位置にNo.5シース($d_{s2} = 170\text{ mm}$)があることに注意してほしい。No.1シースの分析とまったく同一の分析手順で得た充填分析結果である。

【0230】

図58(a)は自励振動P波分析結果であり。シース自励P波($d_s | \text{自}P$)の t_h 値を前記 $156\text{ }\mu\text{秒}$ とし、No.5シース(充填)のシース反射波($d_{s2} | M_2$)の起生時刻を[数13']で $t[d_{s2} | M_2] = 204\text{ }\mu\text{秒}$ と計算し、 $t_a = t[d_{s2} | M_2]$

50

$2] - t_h = 48 \mu\text{秒}$ として分析している。No. 5のシース反射波($ds_2 | M_1$)の起生時刻は[数12']で $t[ds_2 | M_1] = 152 \mu\text{秒}$ と計算され、 $t_h \sim t_h + t_a$ の時間帯に生ずることになるが、この $[ds_2 | M_1]$ 波は $a = 500 \text{ mm}$ 、 $ds_2 = 170 \text{ mm}$ の時、図55の最下段に示すように、その振幅が極めて小さくなることより、充填有無分析での誤計測を回避できる。

【0231】

一方、図58(b)は自励振動P波とS波の混合波分析であり、 t_h 値は図58(a)の場合と同一であるが、 t_a 値を $t_a = 80 \mu\text{秒}$ と大きくしている。この場合、分析対象時間帯が $156 \mu\text{秒}$ から $236 \mu\text{秒}$ の間の時系列となり、振幅の大きい以遠シースのよこ波反射波 $[ds_2 | M_2]$ 波の起生時刻が[数13]で ds を ds_2 に置き替えた[数13']で $204 \mu\text{秒}$ と計算されることより、この波が混入することになる。

10

【0232】

この $[ds_2 | M_2]$ 波を起生させるNo. 5シースは充填シース故、卓越振動数 f_s の波となる。これが原因してNo. 2シースが空であるにも関わらず、充填シースらしいと誤計測している。

【0233】

さらに図58(c)は自励振動S波による分析結果である。シース自励振動S波の起生時刻 t_h を[数15]で $t_h = 214 \mu\text{秒}$ と算定し、 $t_a = 54 \mu\text{秒}$ として分析した結果である。 $t_h \sim t_h + t_a$ ($213.8 \sim 267.8 \mu\text{秒}$)の時間帯の中には、前記振幅の大きいNo. 5シースのよこ波反射波 $[ds_2 | M_2]$ (起生時刻 $204 \mu\text{秒}$)の後方継続波(卓越振動数 f_s)が混入することより、計測対象No. 2シースが空であるにも関わらず完全充填と誤計測している。

20

【0234】

次に請求項5の記述に関連する分析法を説明する。

前記図51のNo. 2シース(空シース)の図58(a)に対応する分析例である。前記自励振動P波の起生時刻 $t_h = 156 \mu\text{秒}$ 、 $t_a = 48 \mu\text{秒}$ として、[数27]で $TG C(t_h, t_a)$ 関数を用いて $GA_j(t)$ を求め、対応するスペクトル $FA_j(f)$ を[数28]で求めている。この後、前記中心振動数を f_k とする $A(f)$ 関数を用い[数29]、[数30]で $FB_j(f)$ 、 $GB_j(t)$ を求める演算を $f_k = 1.0 \text{ kHz}$ として $f_k = f_k + f_k$ の計算の都度繰り返し、最も明確に前記 f_s 、 f_k のシース自励波卓越振動スペクトルが得られたと判断した $f_k = 58 \text{ kHz}$ 時の最大エントロピースペクトル $FB^n_j(f)$ と対応する時系列 $GB^n_j(t)$ を $n = 1$ として図59に示している。

30

なお、前記数式の添字は複数の計測対象シースを示す i だが、ここでは計測対象シースの多点受信波と加算波平均の並びを示す j で示している。

【0235】

シース自励波卓越振動数 f_s 、 f_k の双方のスペクトルの出現を確認でき、空シースと分析されている。本分析法で、自励P波とS波の混合波及び自励振動S波で分析を行っても、前記No. 5シースのよこ波反射波 $[ds_2 | M_2]$ 波の存在でそれぞれ図58(b)、(c)とほとんど同一の分析結果となり、空シースを充填シースと誤計測する(分析結果提示せず)。

40

【0236】

請求項2～5の内容に共通する事項を説明しておく。

$FB^n_j(f)$ (n は1以上の整数)の最大エントロピー法スペクトルにおいて、 f_k 値の 30 kHz から 60 kHz への $f_k = 1.0$ 又は 2.0 の増分による変化の推移の中で加算平均波 $FB^n_j = n_w(f)$ スペクトルにおいて 38 kHz から 65 kHz の振動数帯域に生ずるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_k 、 $15 \text{ kHz} \sim 30 \text{ kHz}$ の振動数帯域に生ずるスペクトルの中心振動数をシース反射波の卓越振動数 f_s として特定している。 $FB^n_j = n_w(f)$ 最大エントロピー法スペクトル最終分析結果は前記 f_k 、 f_s 値が最も明確に特定できる時の f_k 値で得られるスペクトルと

50

している。このスペクトル形状と図 2 1 のスペクトル形状との対比で、計測対象シースの充填有無探査を行うことになる。

【 0 2 3 7 】

本計測分析法は、コンクリート構造物構築時、コンクリート打設時間の異なる時に生じる打設境界面（コールドジョイント）が密着しているか、剥離して微細な空気層が生じているかの探査にも、そのまま適用できる。シース充填有無探査はシース内の線的空洞を探査対象としているが、このコールドジョイントの密着 / 剥離探査は面的であることより f_s 、 f_k 卓越振動数スペクトルをより明解に取得できる。

【 0 2 3 8 】

この発明の構成と、上述の実施形態との対応において、
この発明のシース反射波は、計測対象シース反射波 1 0 1 に対応し、
以下同様に、

所定の時刻関数は、 $TGC(t)$ 関数に対応し、

充填材は、グラウト又はセメントミルクに対応し、

振動数関数 $A(f)$ は、 $A_n(f)$ フィルタリング処理波関数に対応し、

加算平均波取得手段、切出手段、対応スペクトル算出手段、シース充填判断手段、及び変換スペクトル算出手段は、解析プログラムを実行する超音波探査装置の CPU 4 0 に対応するも、

この発明は、上述の実施形態の構成のみに限定されるものではなく、多くの実施の形態を得ることができる。

例えば、上述の説明において、 $TGC(t)$ 関数は主に台形状であったがこれに限定されず、正弦、円弧、その他いずれ形状の時刻関数とすることができる。

また本発明で利用する超音波は、少なくとも $5 \sim 100 \text{ KHz}$ の周波数を一様に含む超音波であり、一般的に広帯域超音波と称されるものを含む。

【 符号の説明 】

【 0 2 3 9 】

1 0 1 ... 計測対象シース反射波

1 1 0 ... 探触子組

3 1 , 1 1 1 ... 発信探触子

3 2 , 1 1 2 ... 受信探触子

2 0 0 ... コンクリート

2 0 1 ... コンクリート面

2 1 0 ... 計測対象シース

a ... 探触子間隔

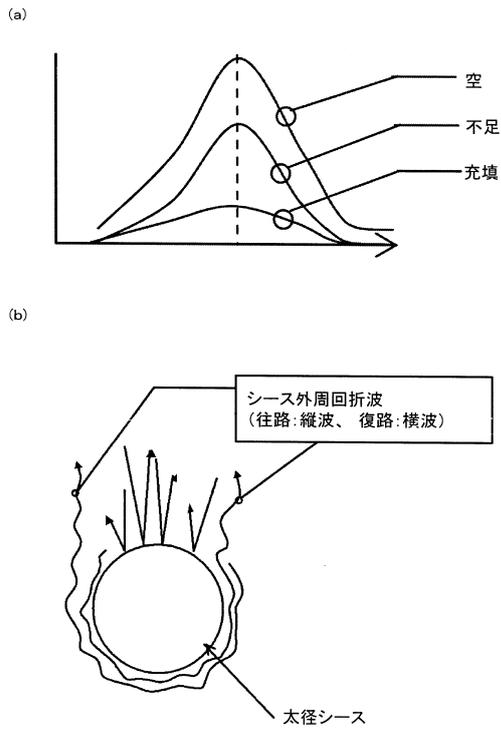
L ... シース長手方向

10

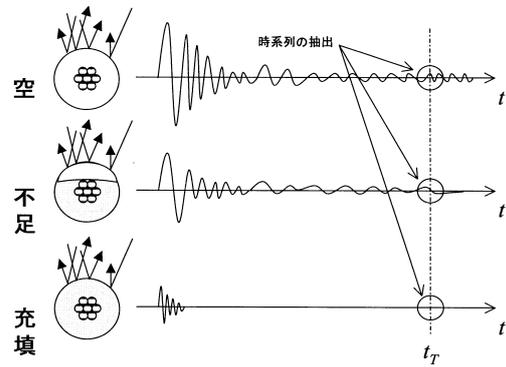
20

30

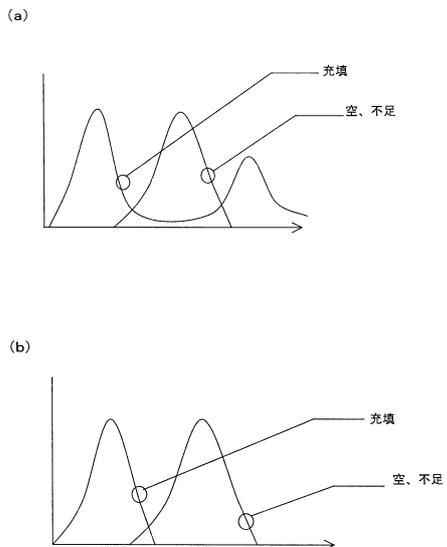
【図1】



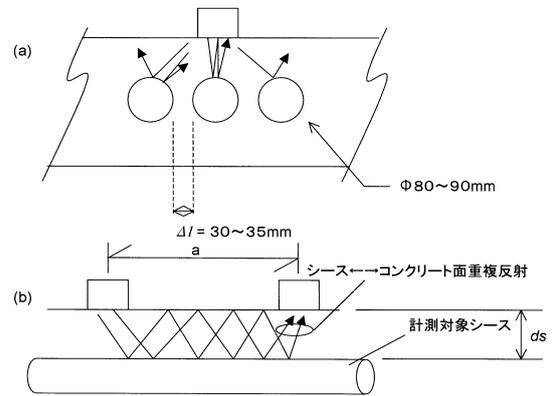
【図2】



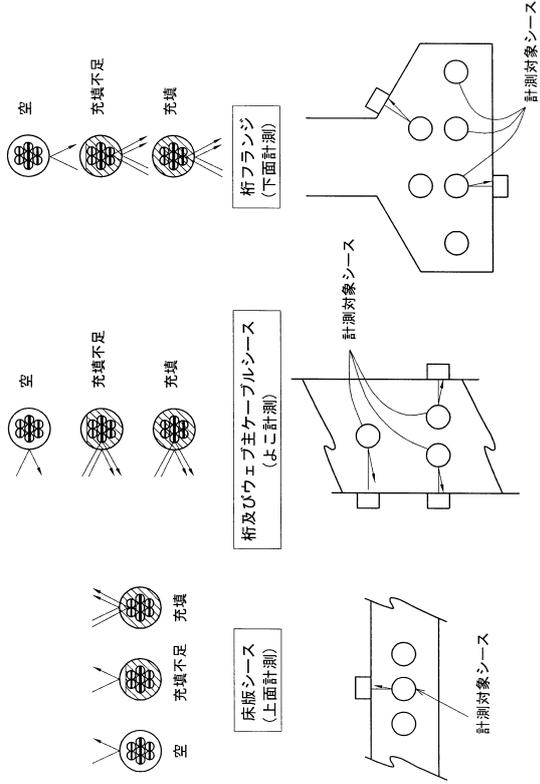
【図3】



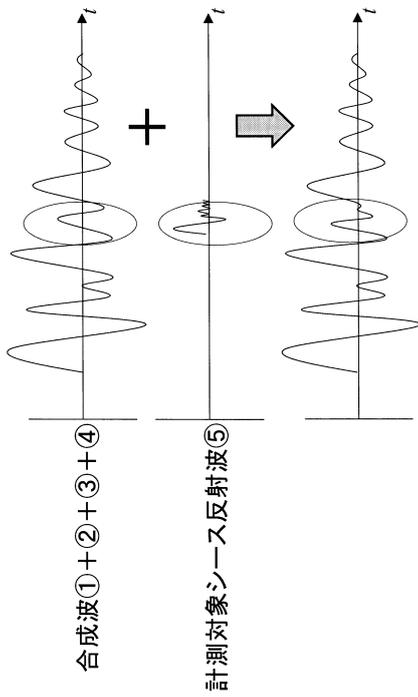
【図4】



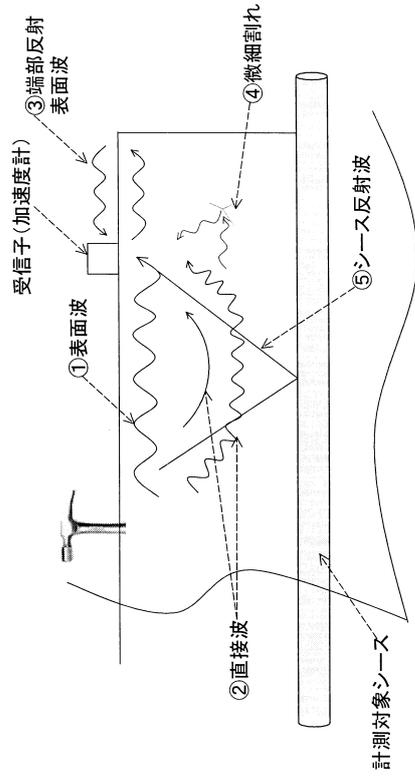
【図5】



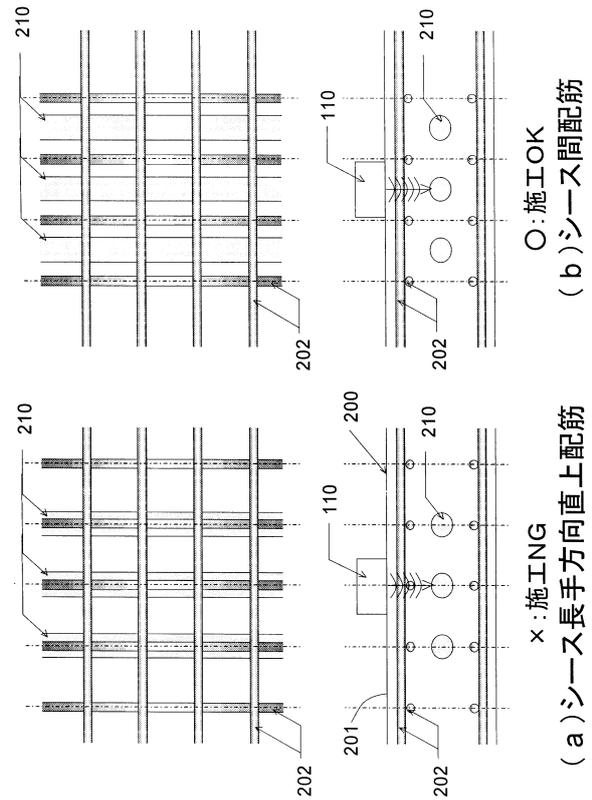
【図7】



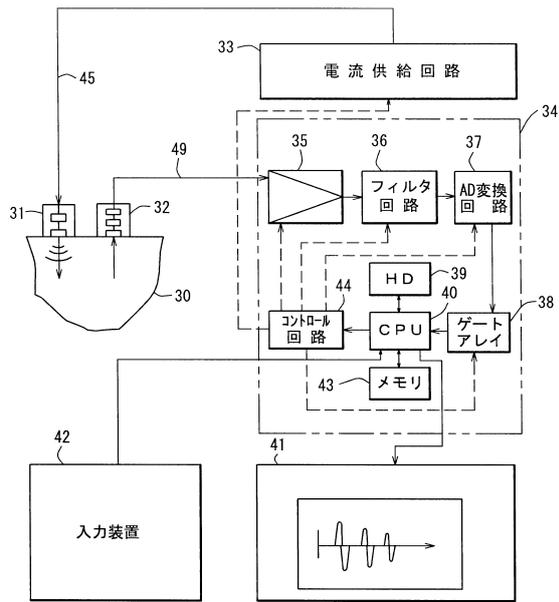
【図6】



【図8】

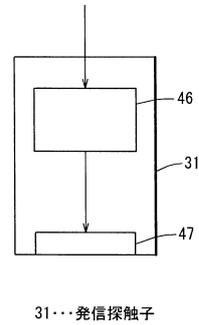


【図9】

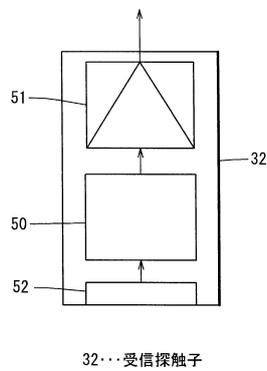


30...既設PC橋梁
 31...発信探触子
 32...受信探触子
 40...CPU(演算手段)

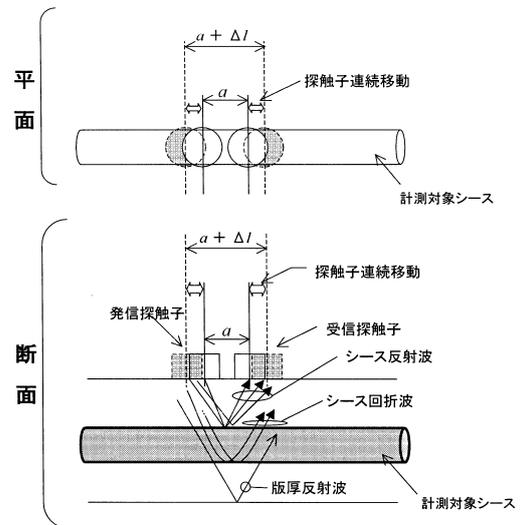
【図10】



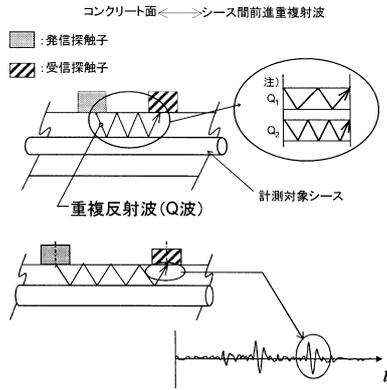
【図11】



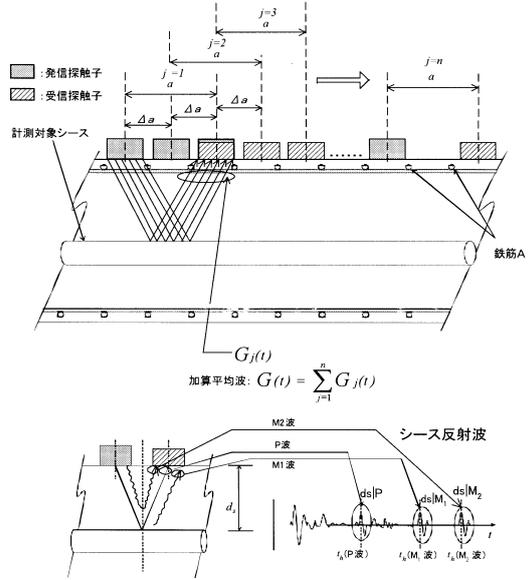
【図12】



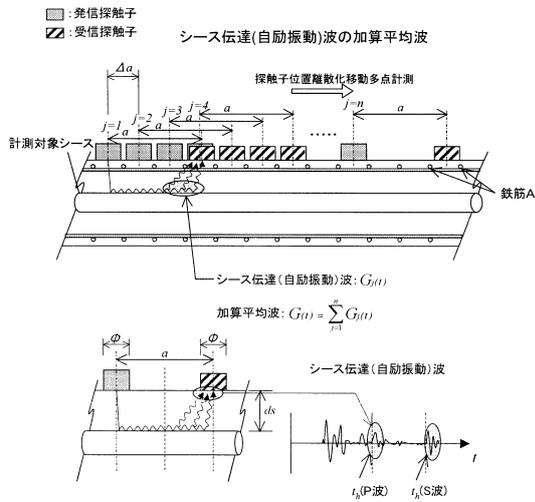
【図13】



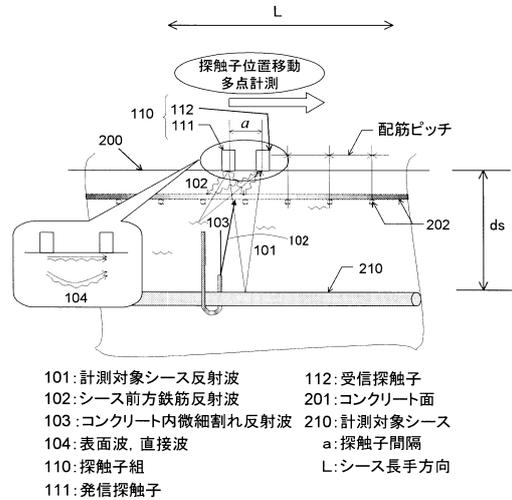
【図14】



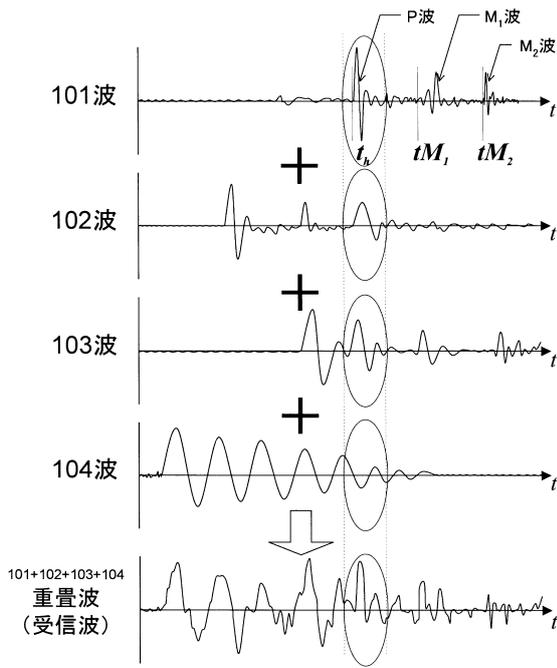
【図15】



【図16】

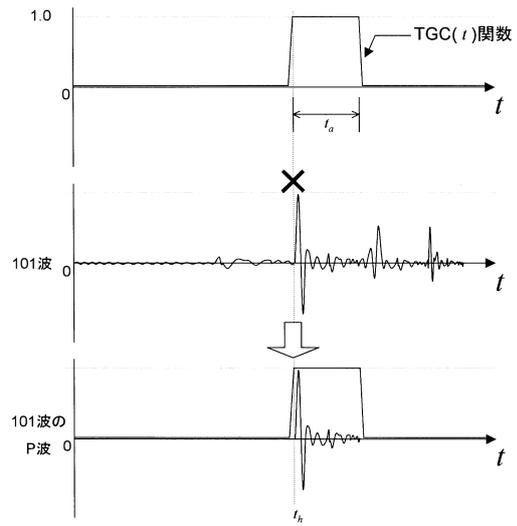


【 図 1 7 】



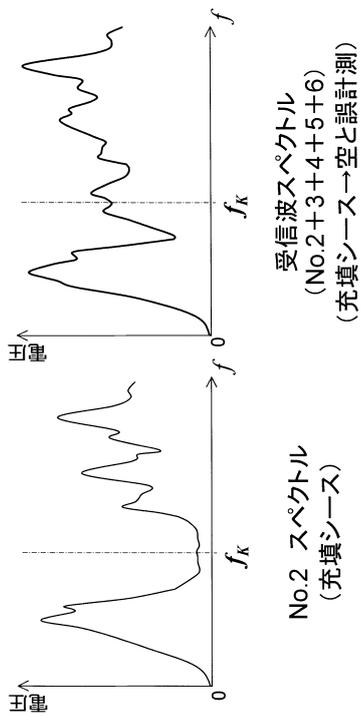
101:計測対象シース反射波

【 図 1 8 】

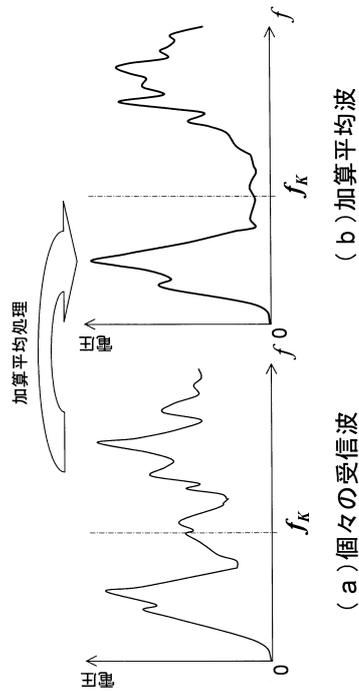


101:計測対象シース反射波
101a:切出波

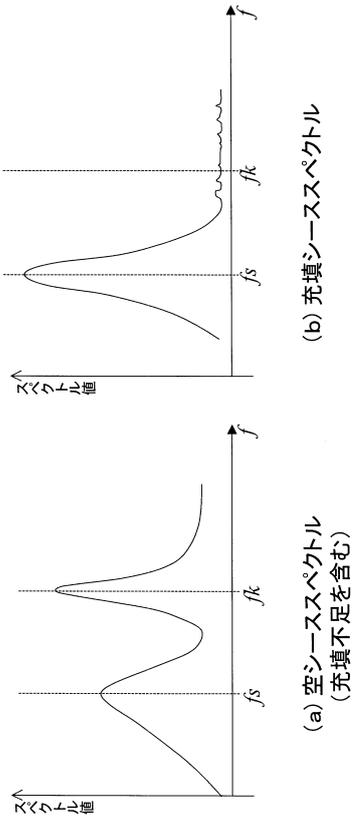
【 図 1 9 】



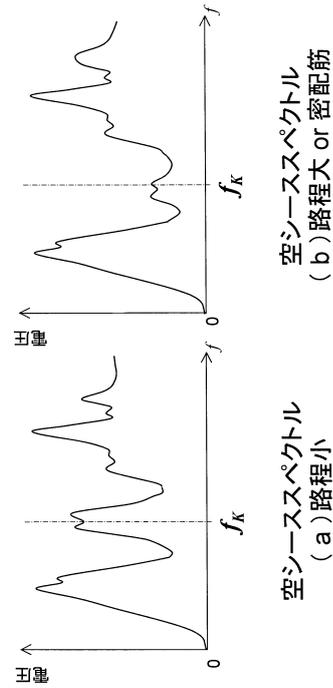
【 図 2 0 】



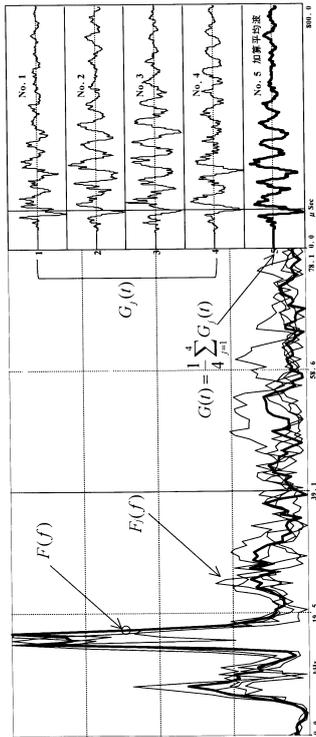
【図 2 1】



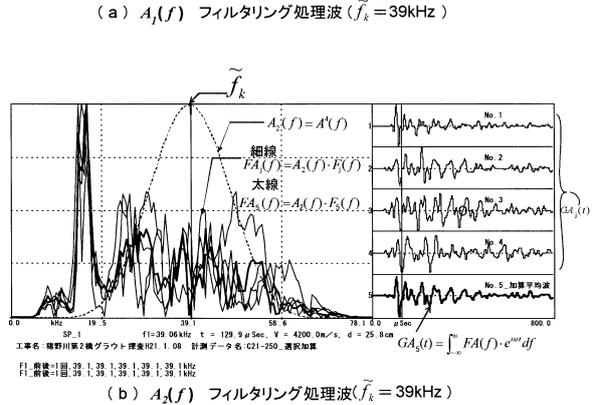
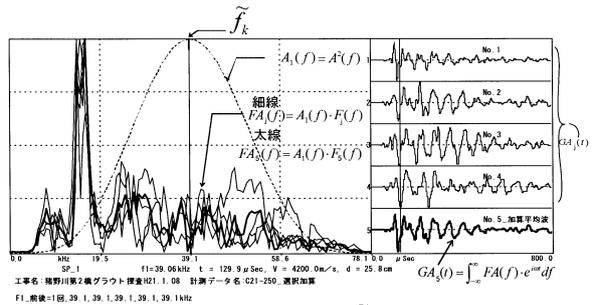
【図 2 2】



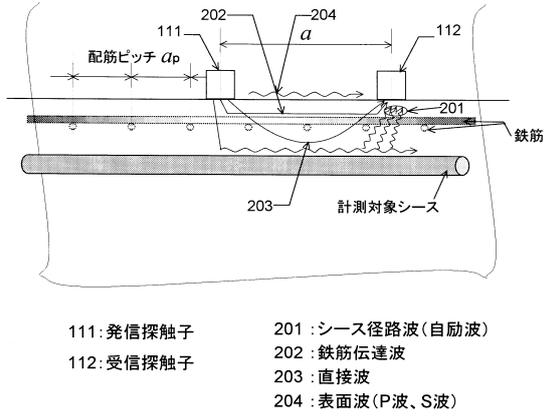
【図 2 3】



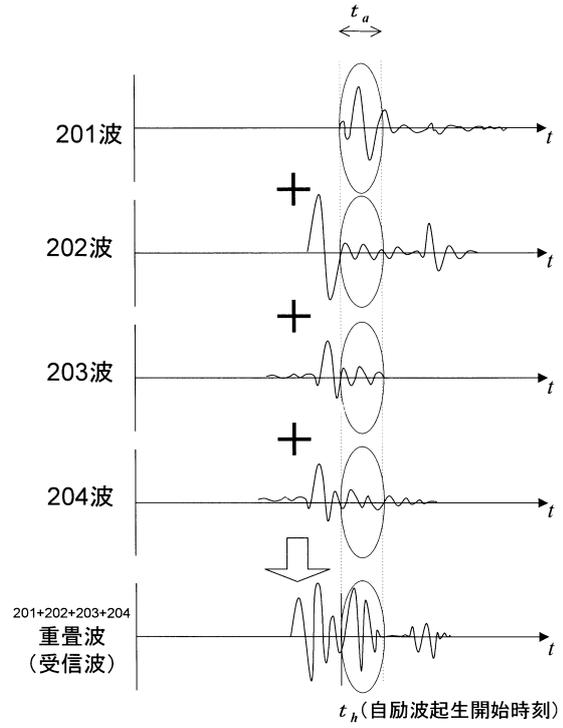
【図 2 4】



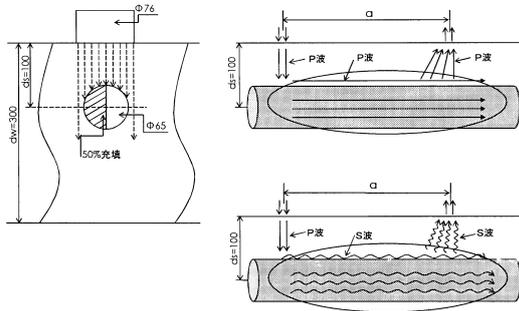
【図27】



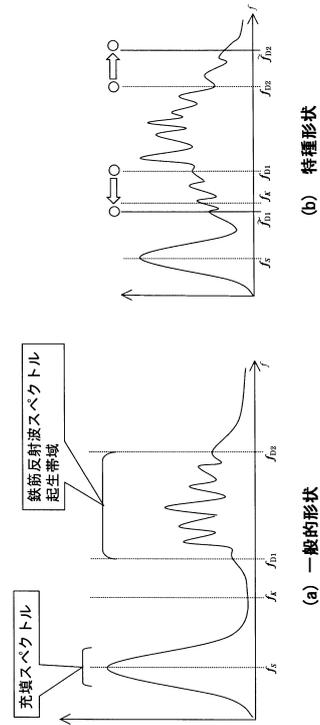
【図28】



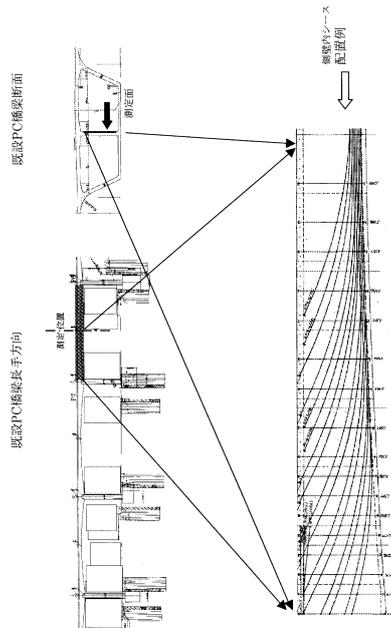
【図29】



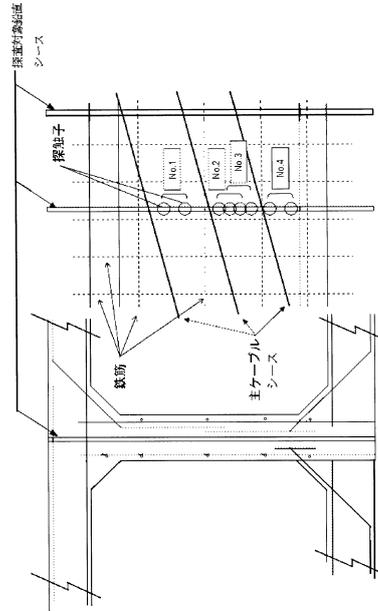
【図30】



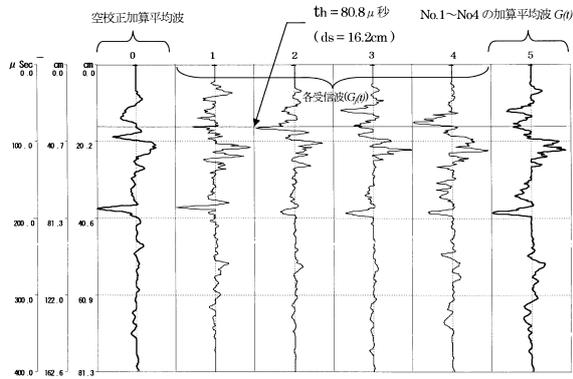
【 図 3 1 】



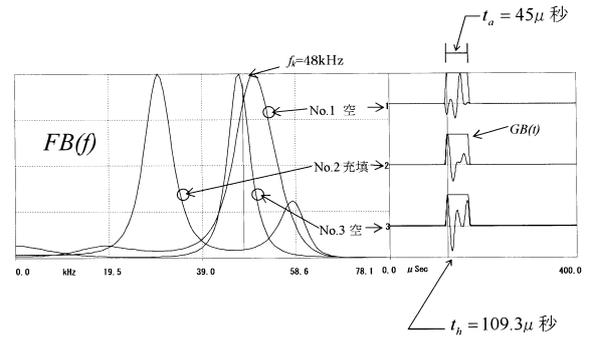
【 図 3 2 】



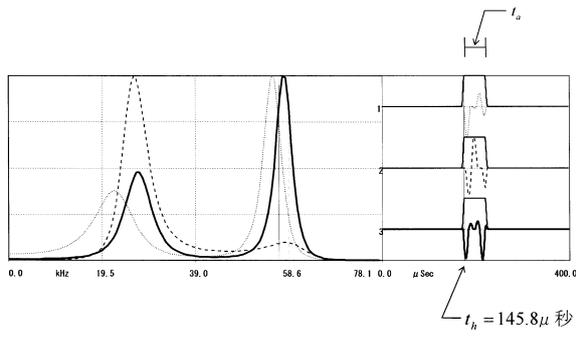
【 図 3 3 】



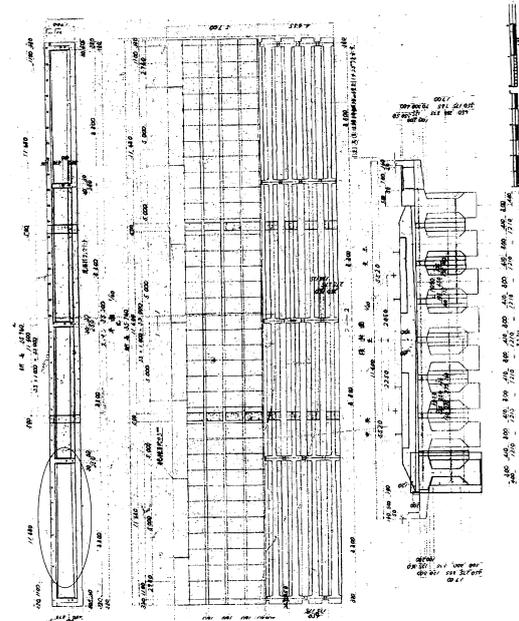
【 図 3 6 】



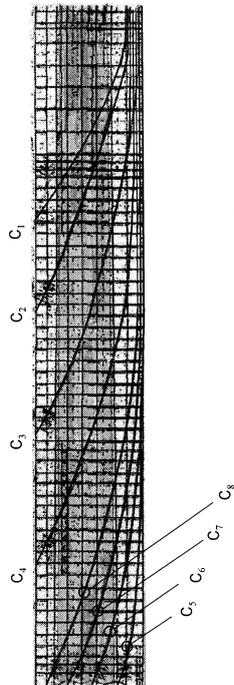
【図 37】



【図 38】

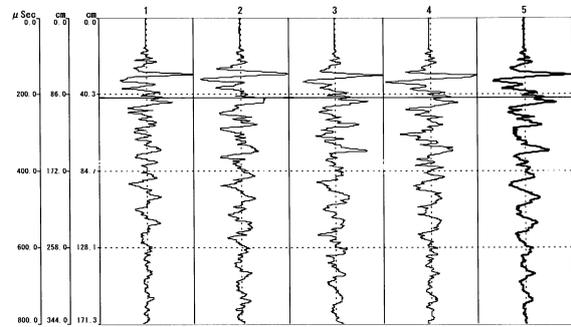


【図 39】

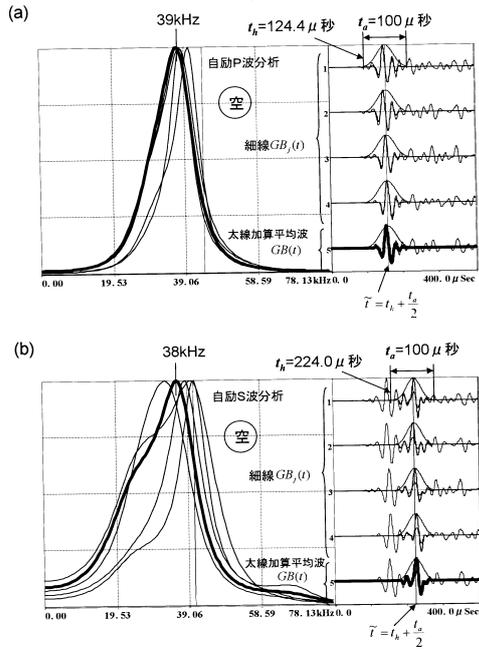


C1-C8:主ケーブルシース ため線及び補線:埋め込み深さ3~6cmの鉄筋

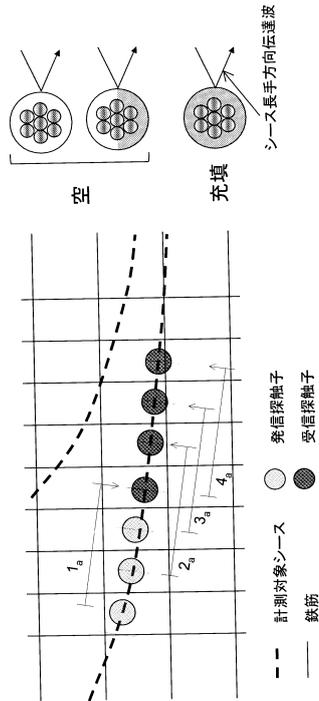
【図 40】



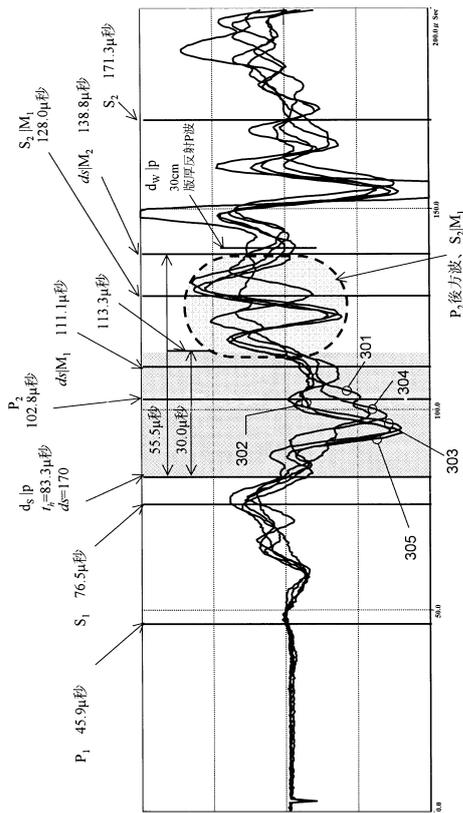
【 図 4 2 】



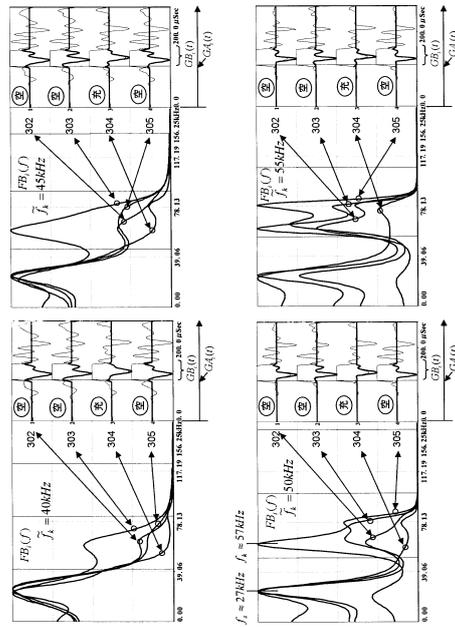
【 図 4 3 】



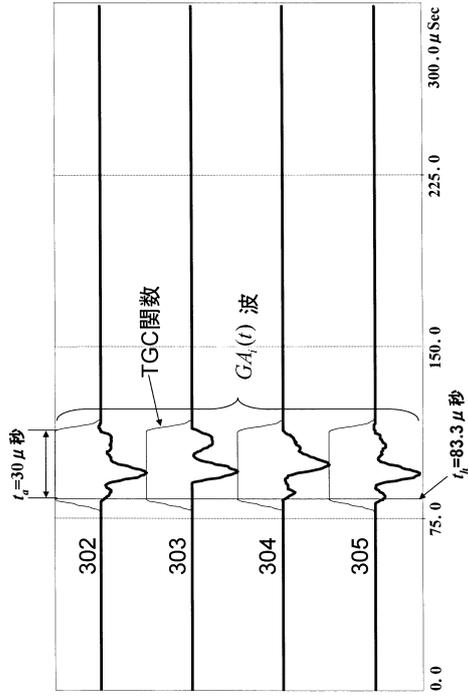
【 図 4 8 】



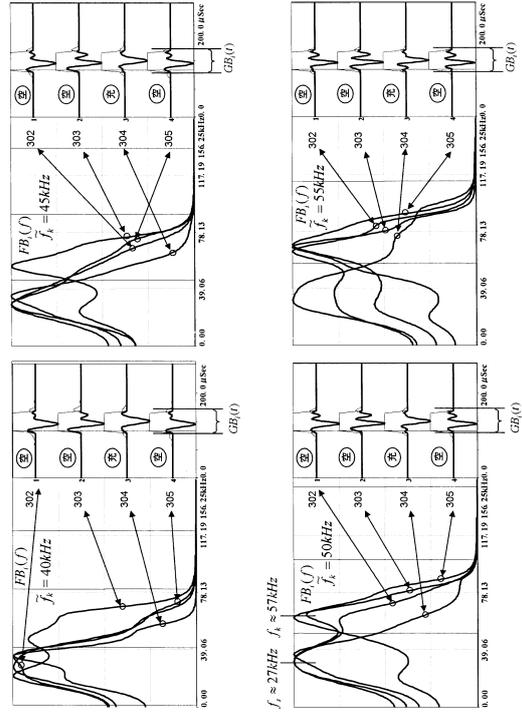
【 図 4 9 】



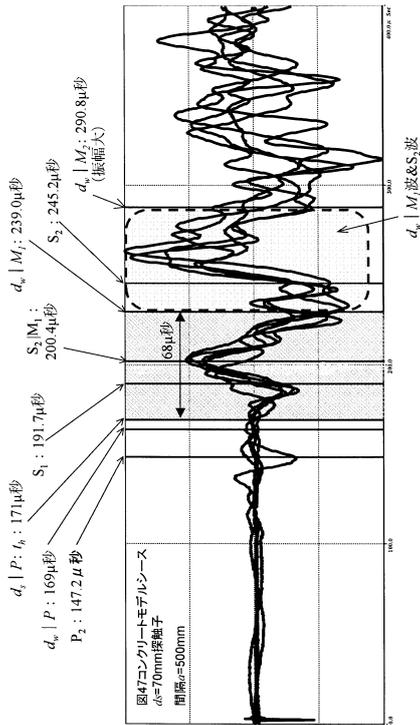
【 図 5 0 】



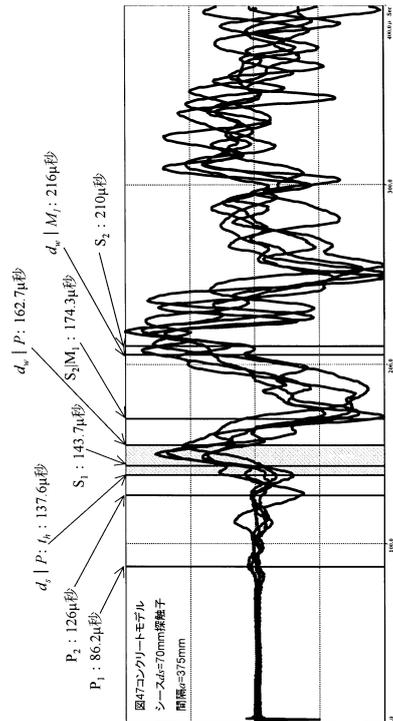
【 図 5 1 】



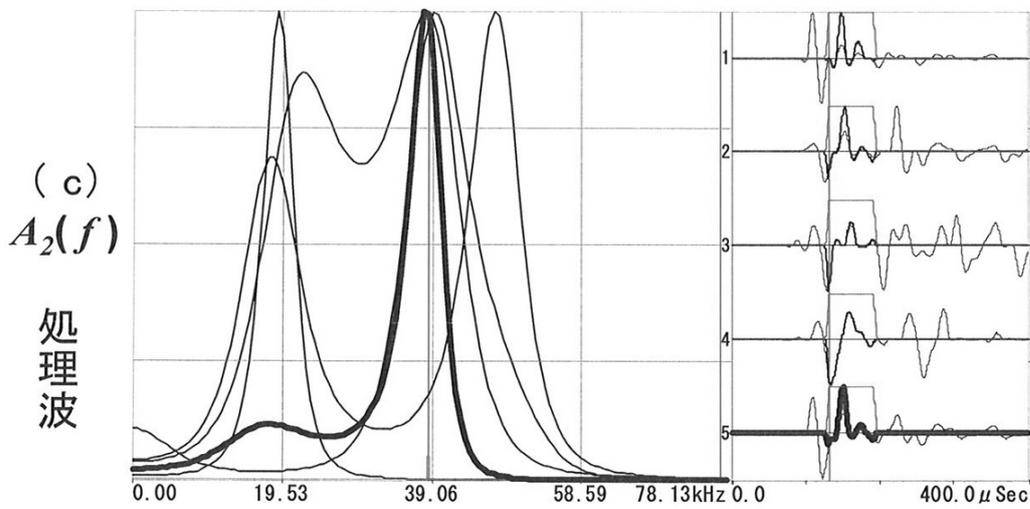
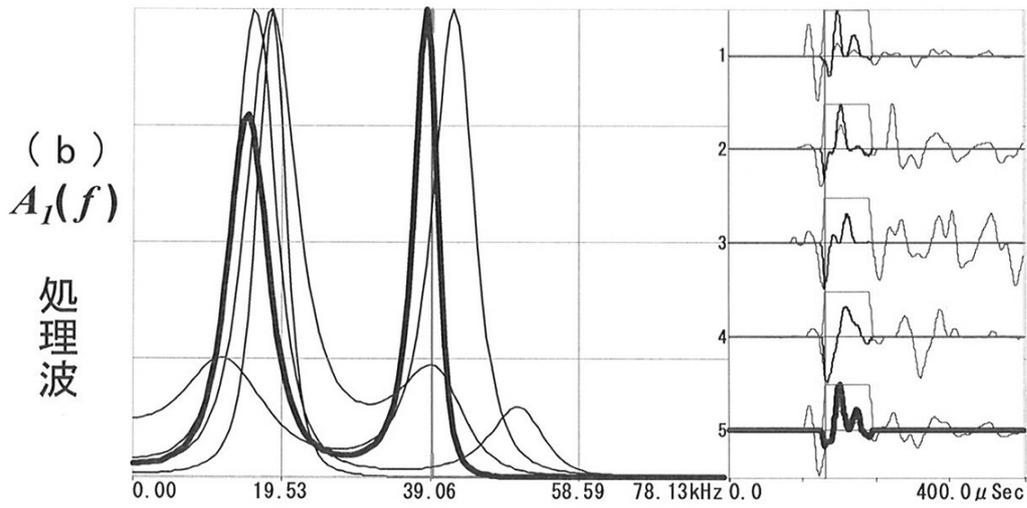
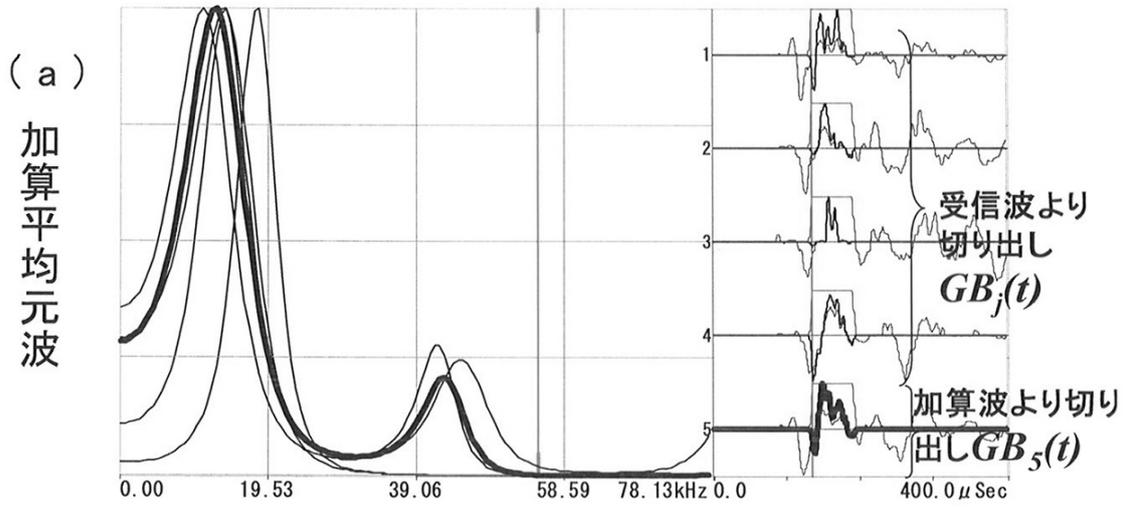
【 図 5 3 】



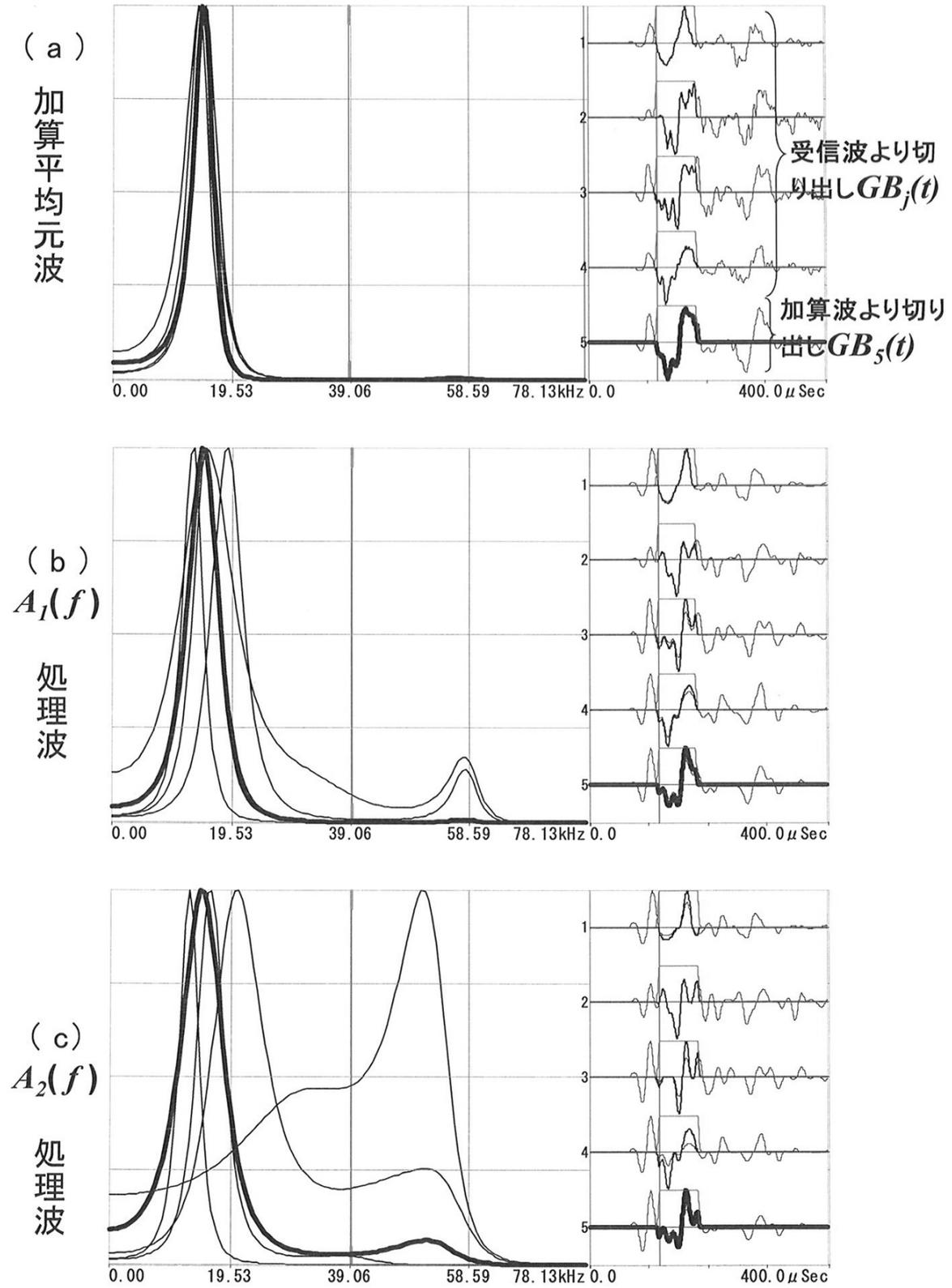
【 図 5 4 】



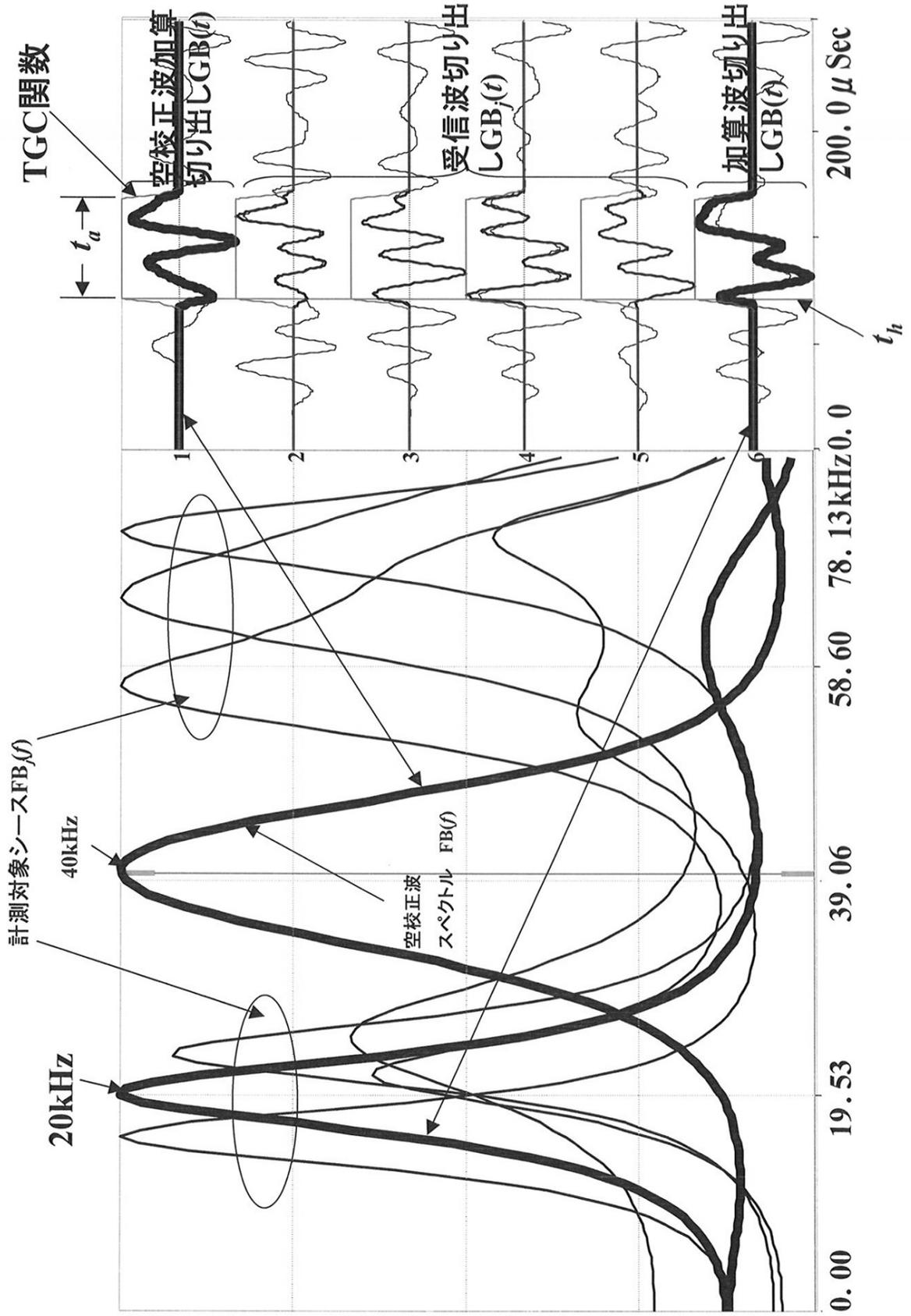
【図25】



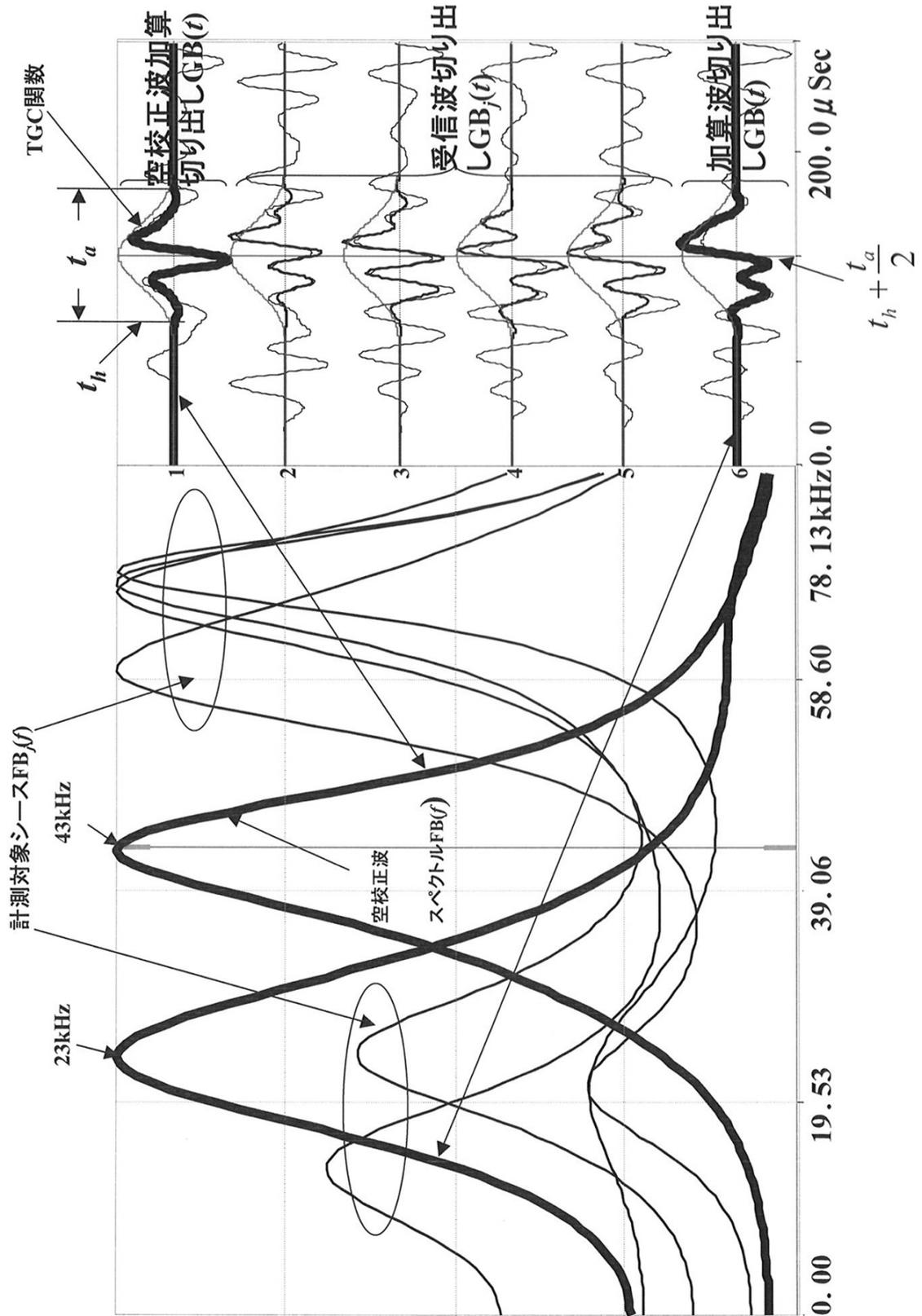
【図26】



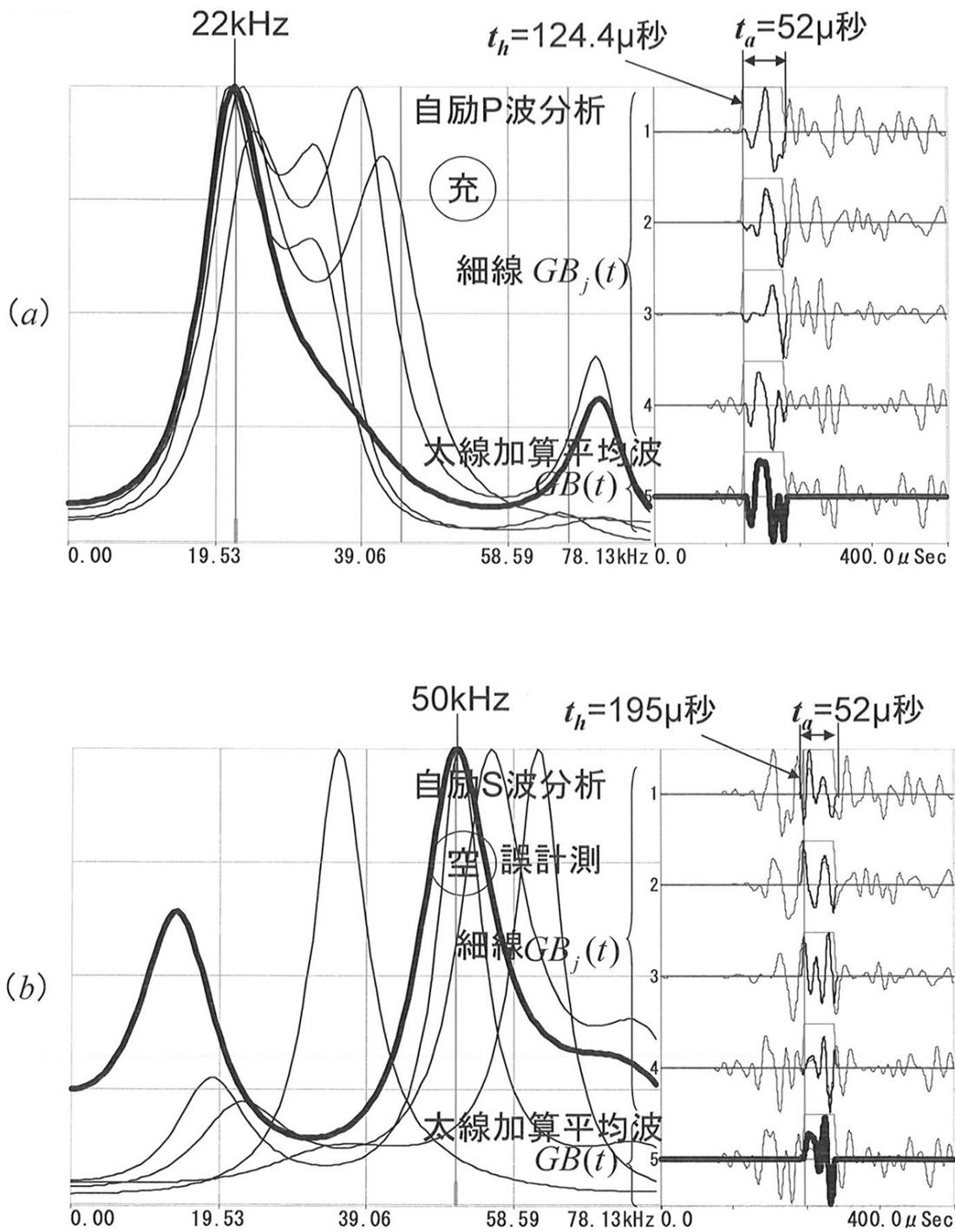
【 図 3 4 】



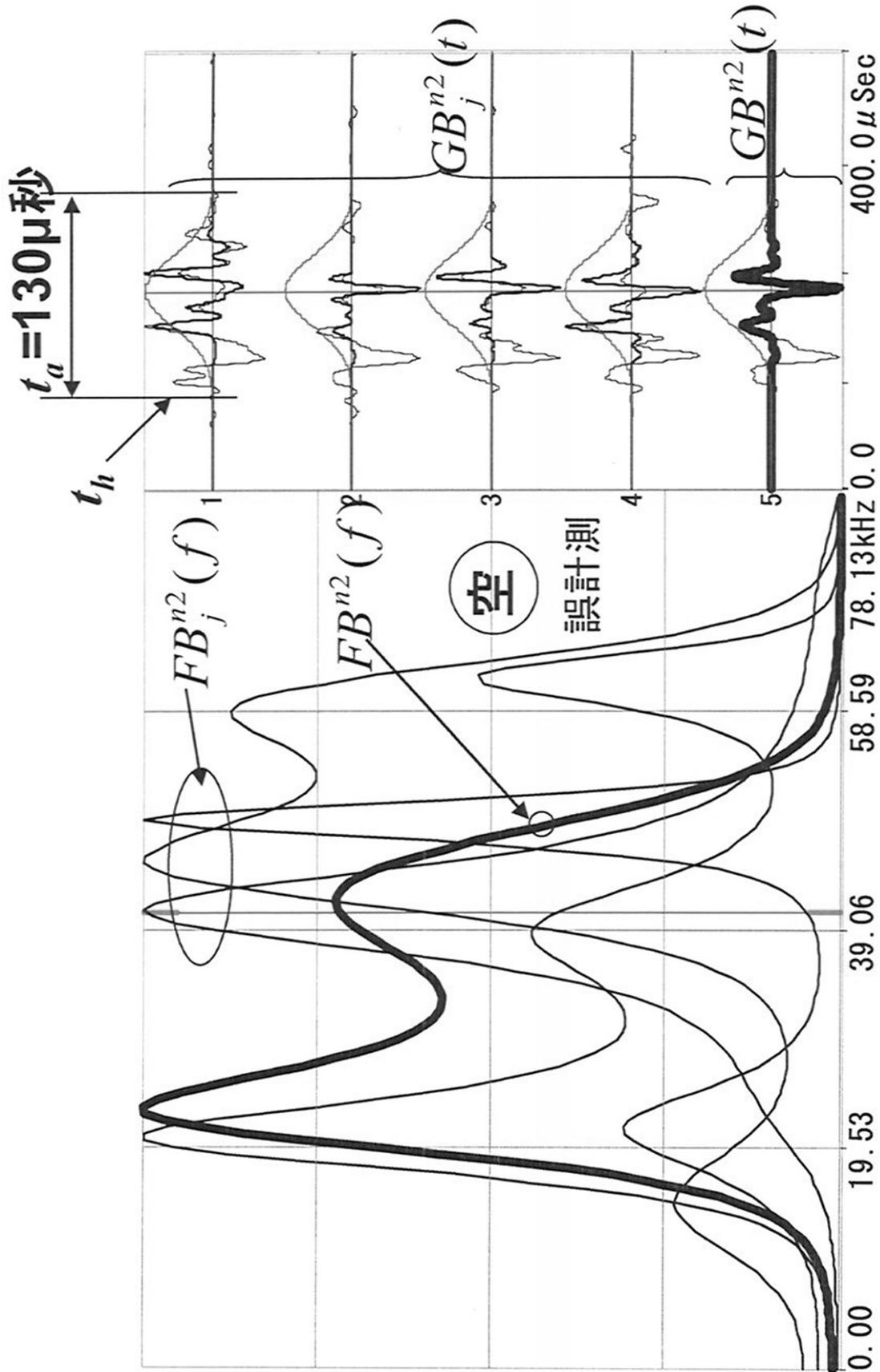
【 図 3 5 】



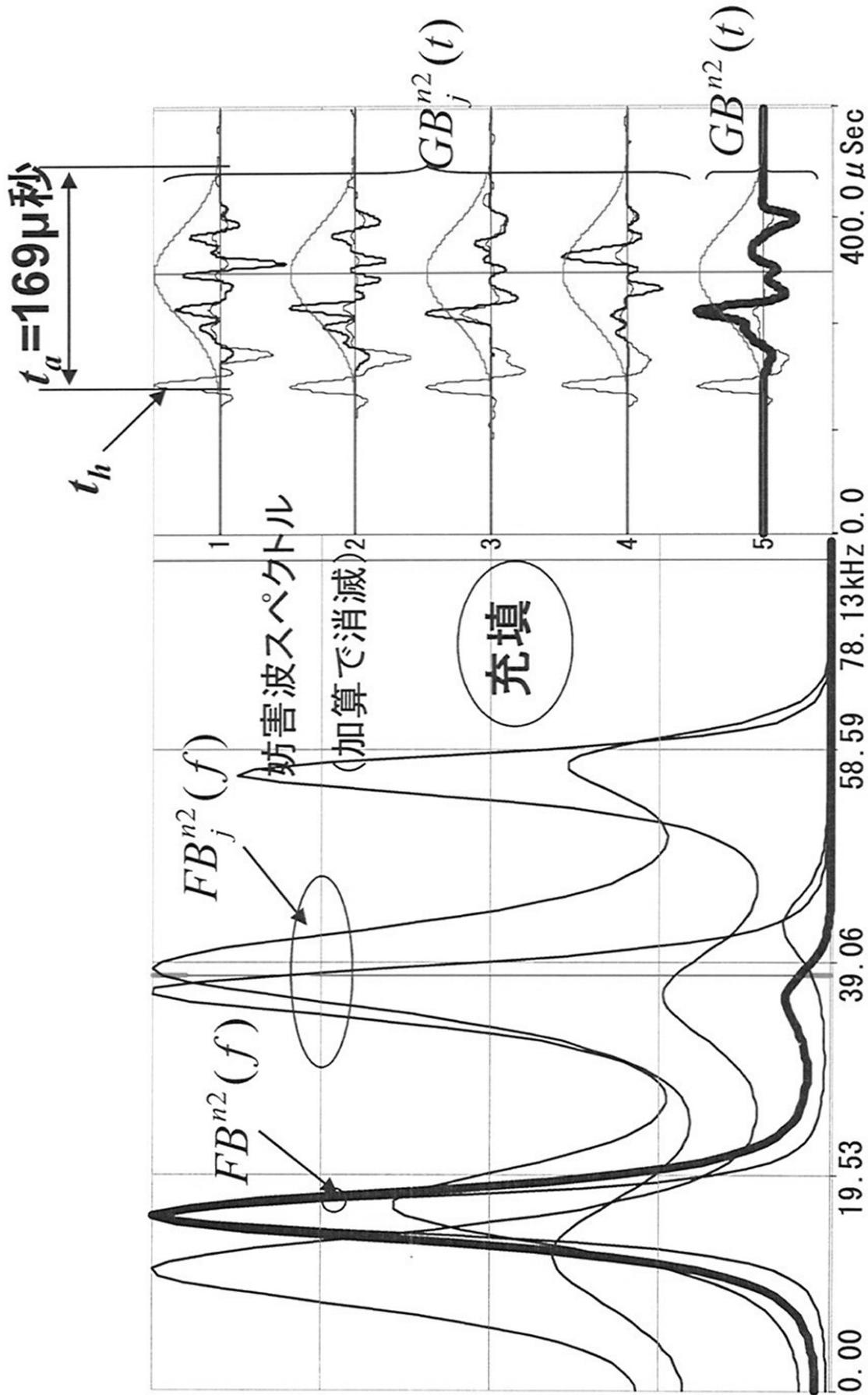
【 図 4 1 】



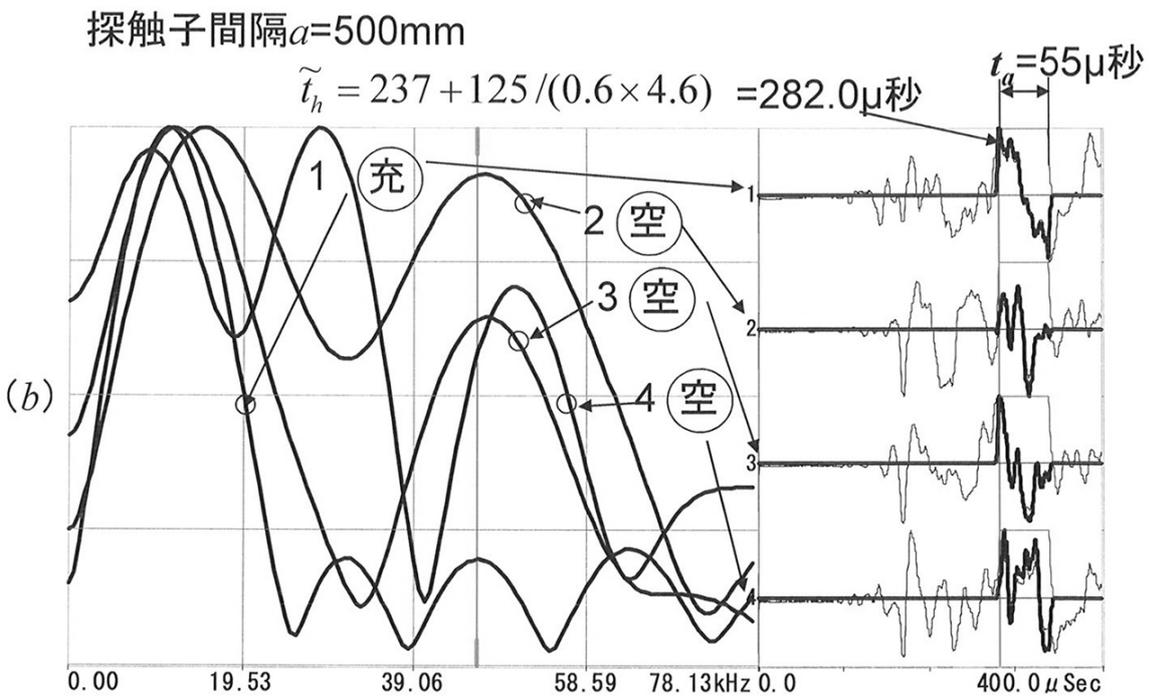
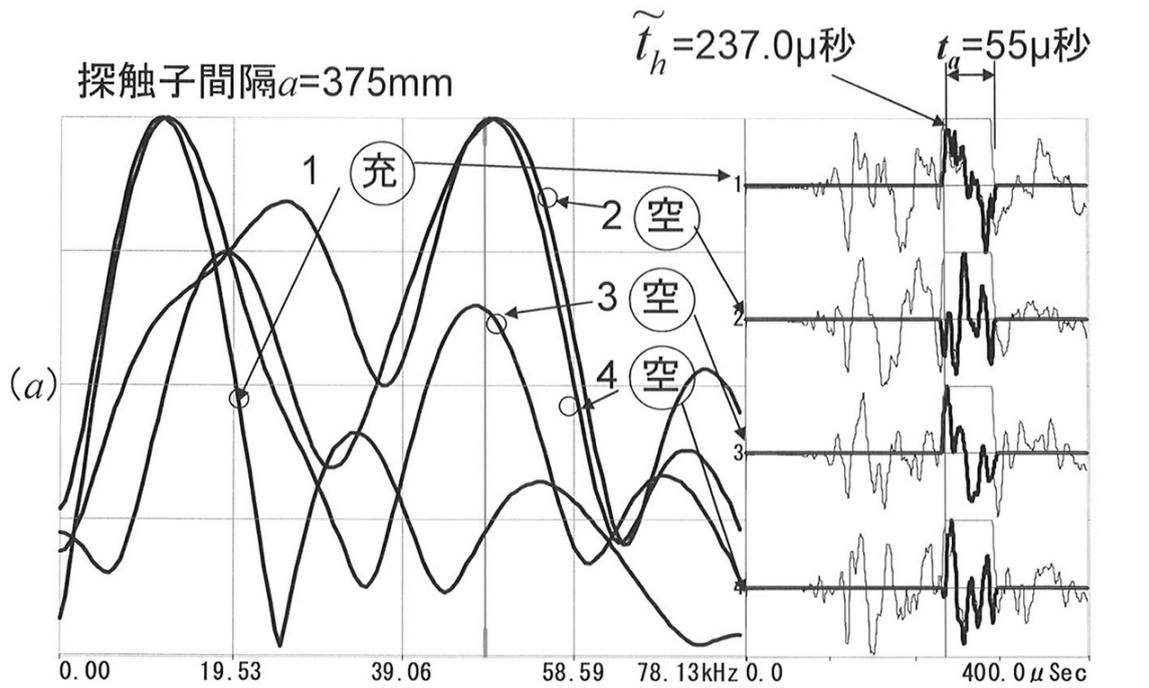
【 図 4 4 】



【 図 4 5 】

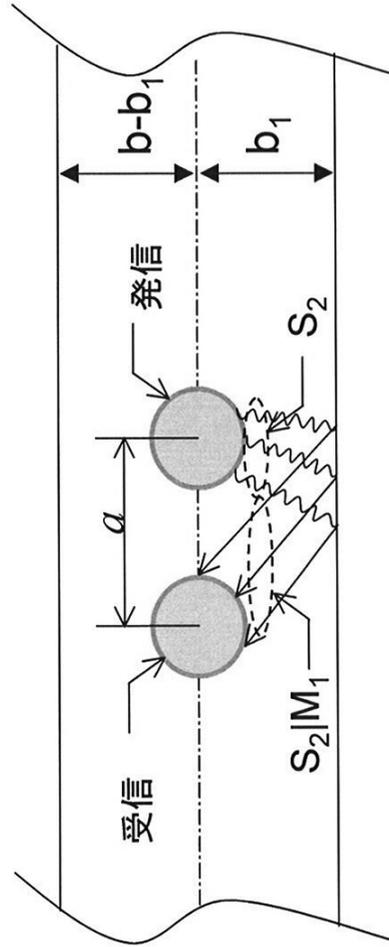
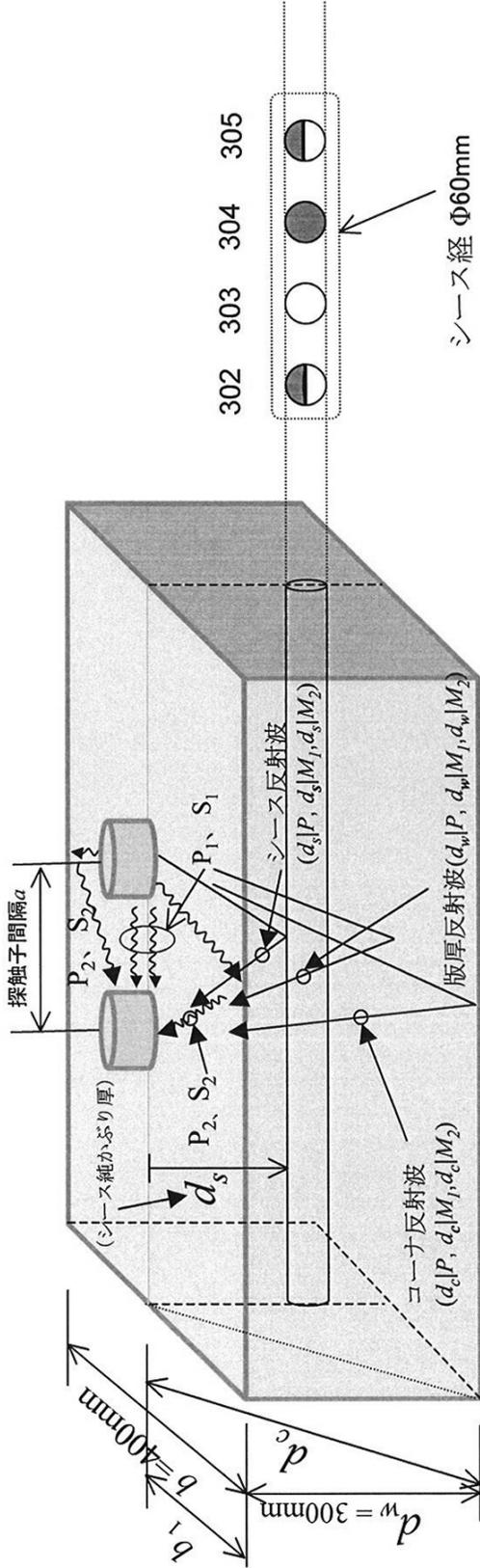


【図46】

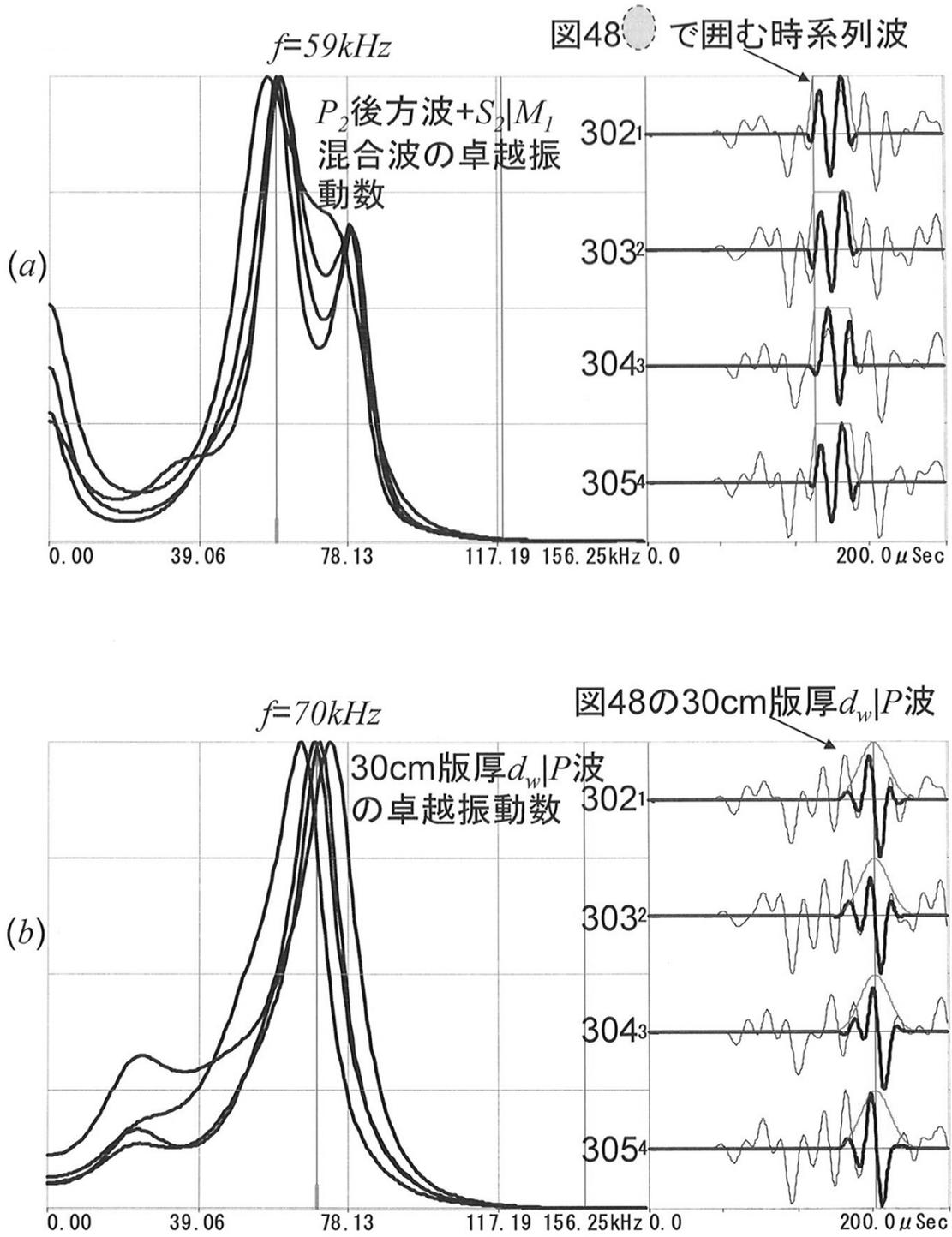


空シース自励波の存在を示す分析事例(FFT表示)

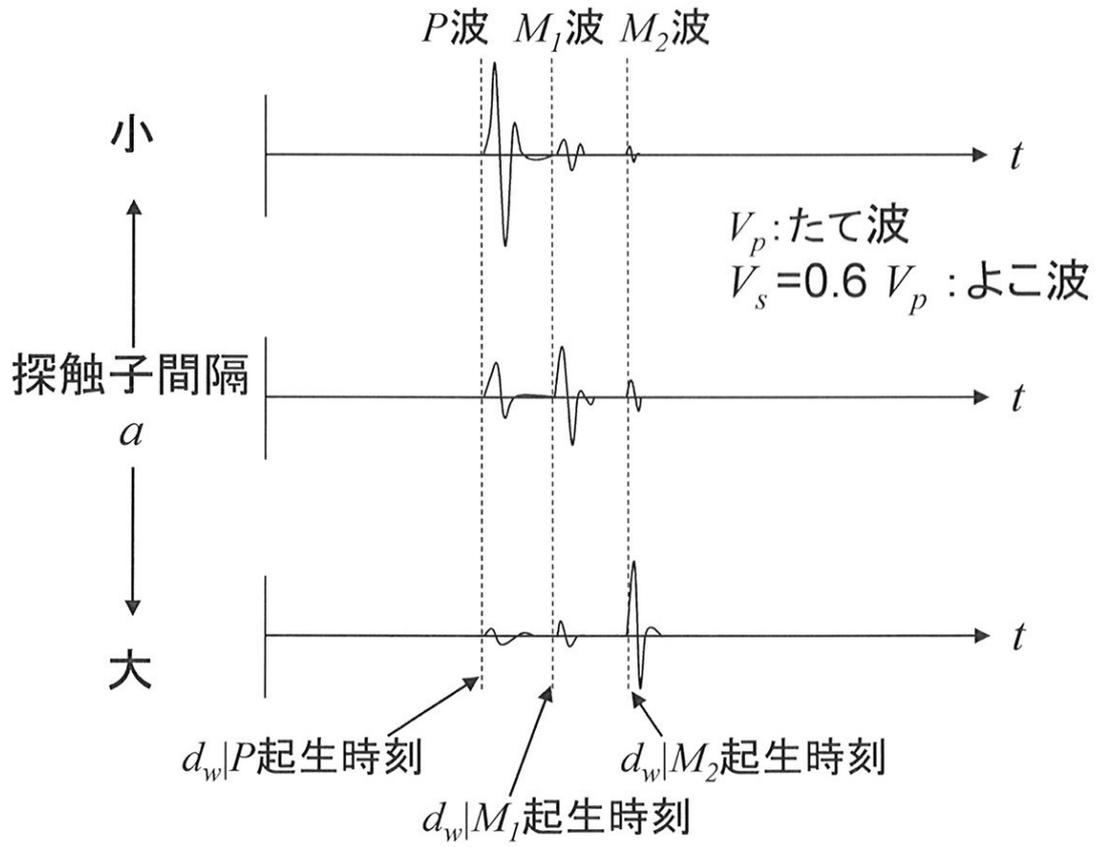
【図47】



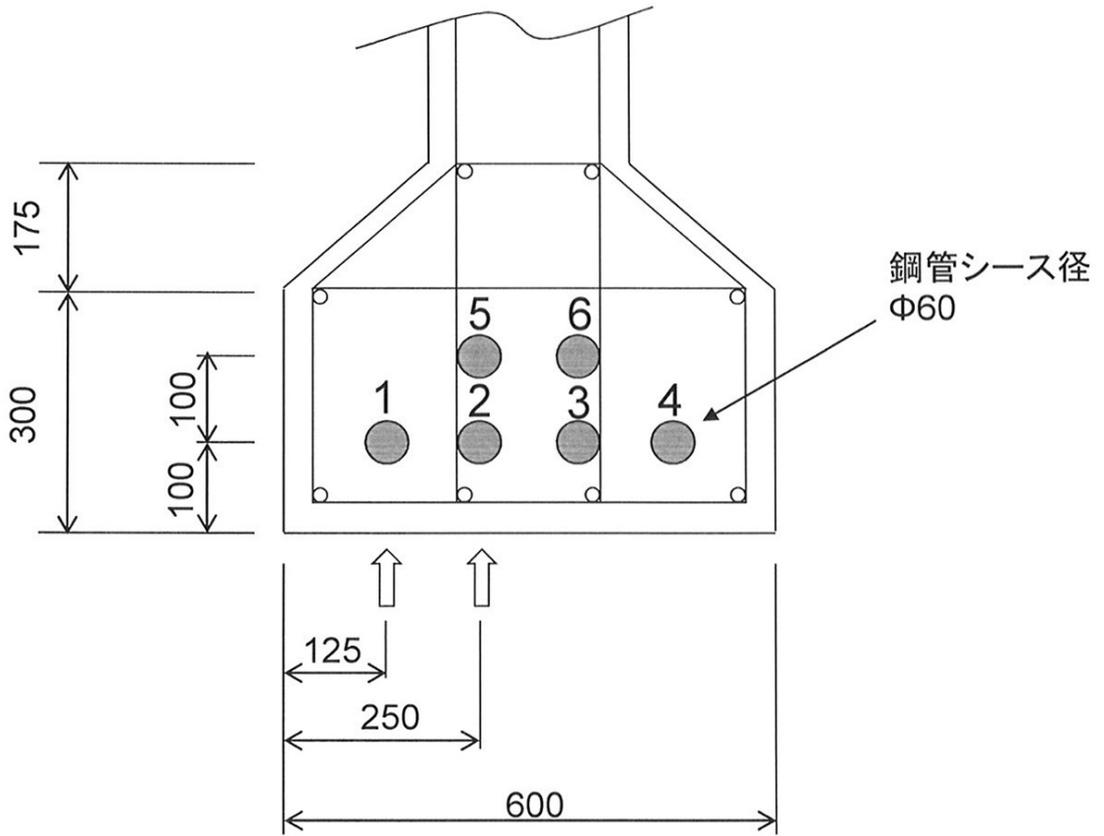
【 図 5 2 】



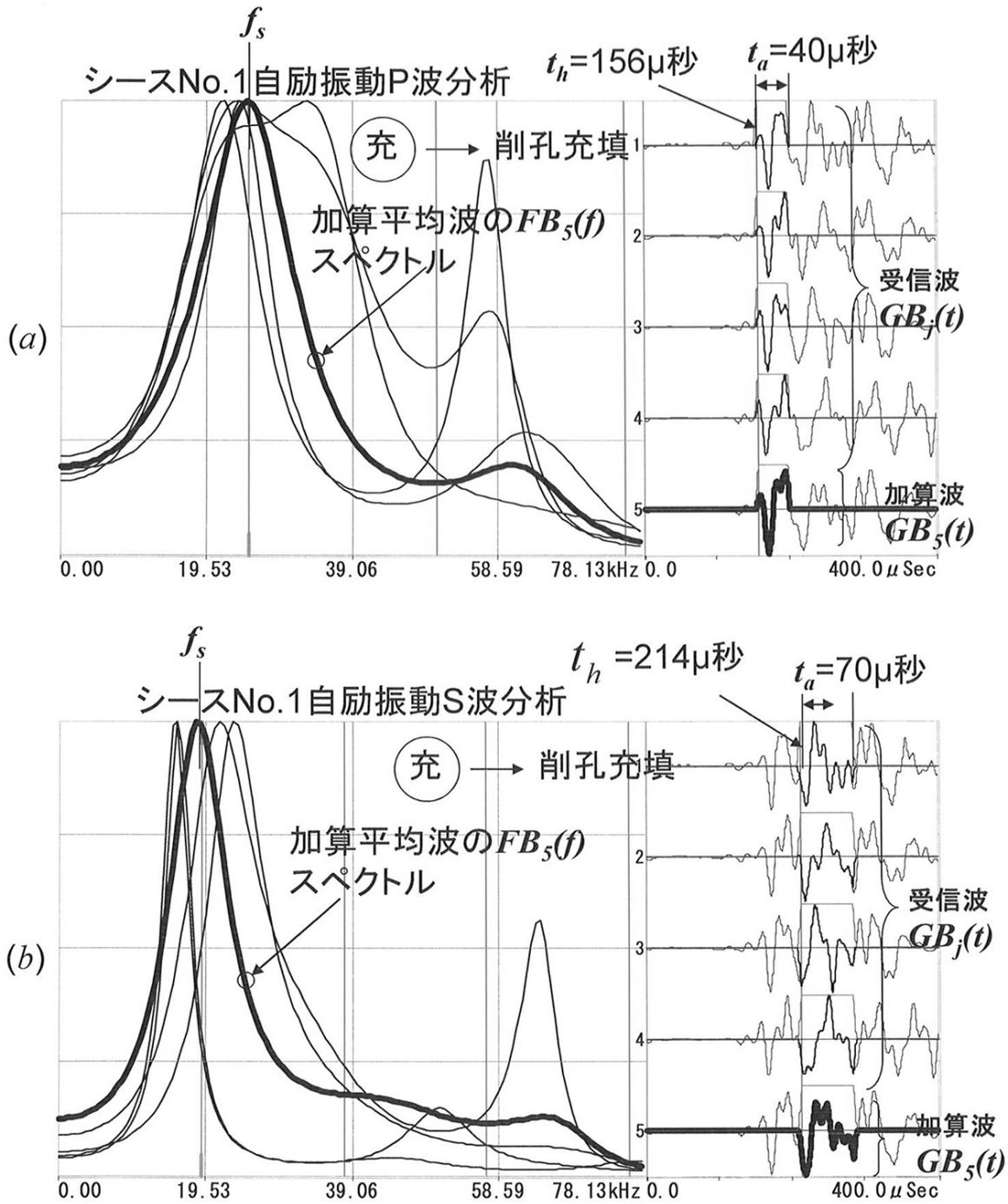
【図55】



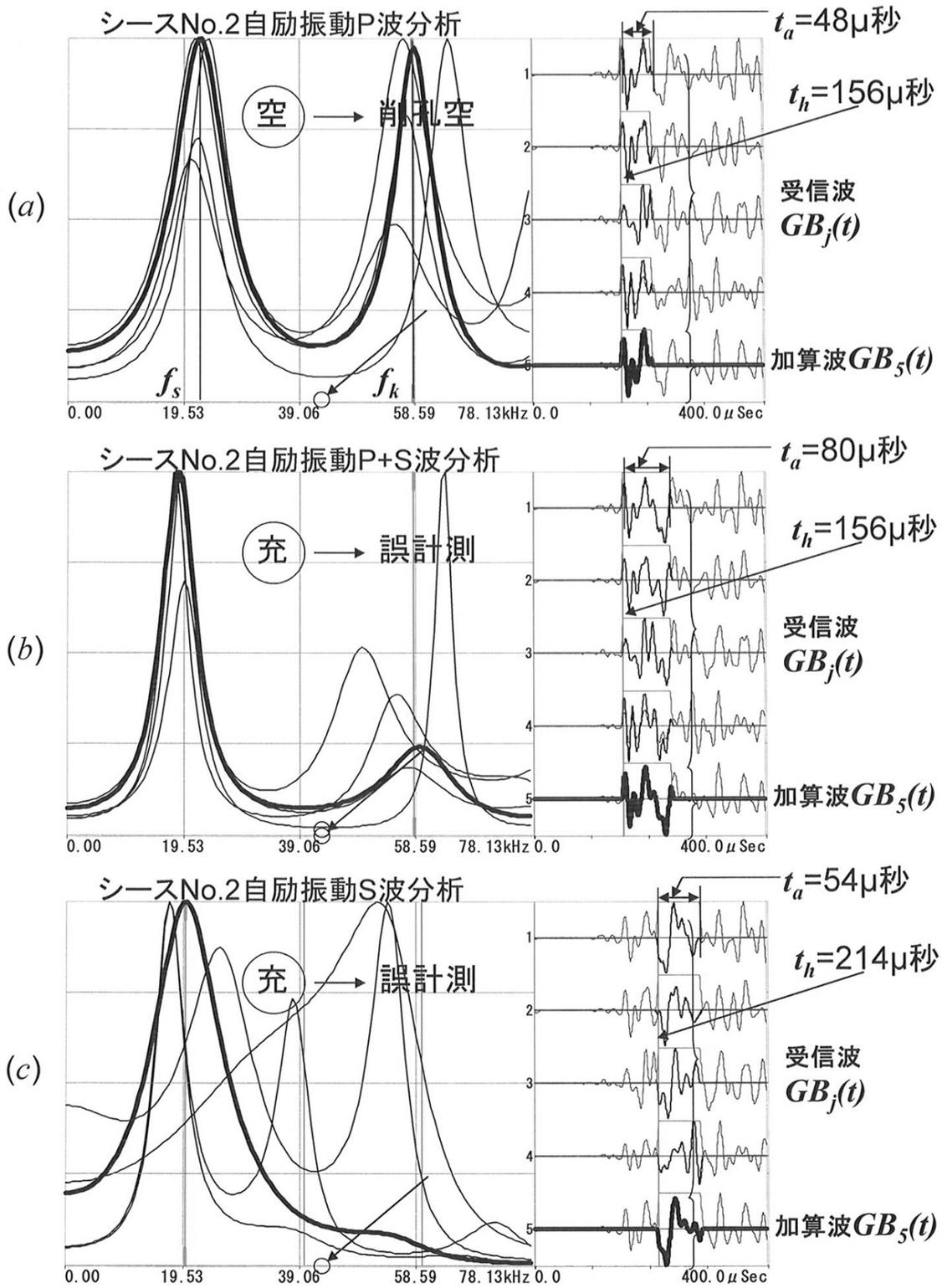
【図56】



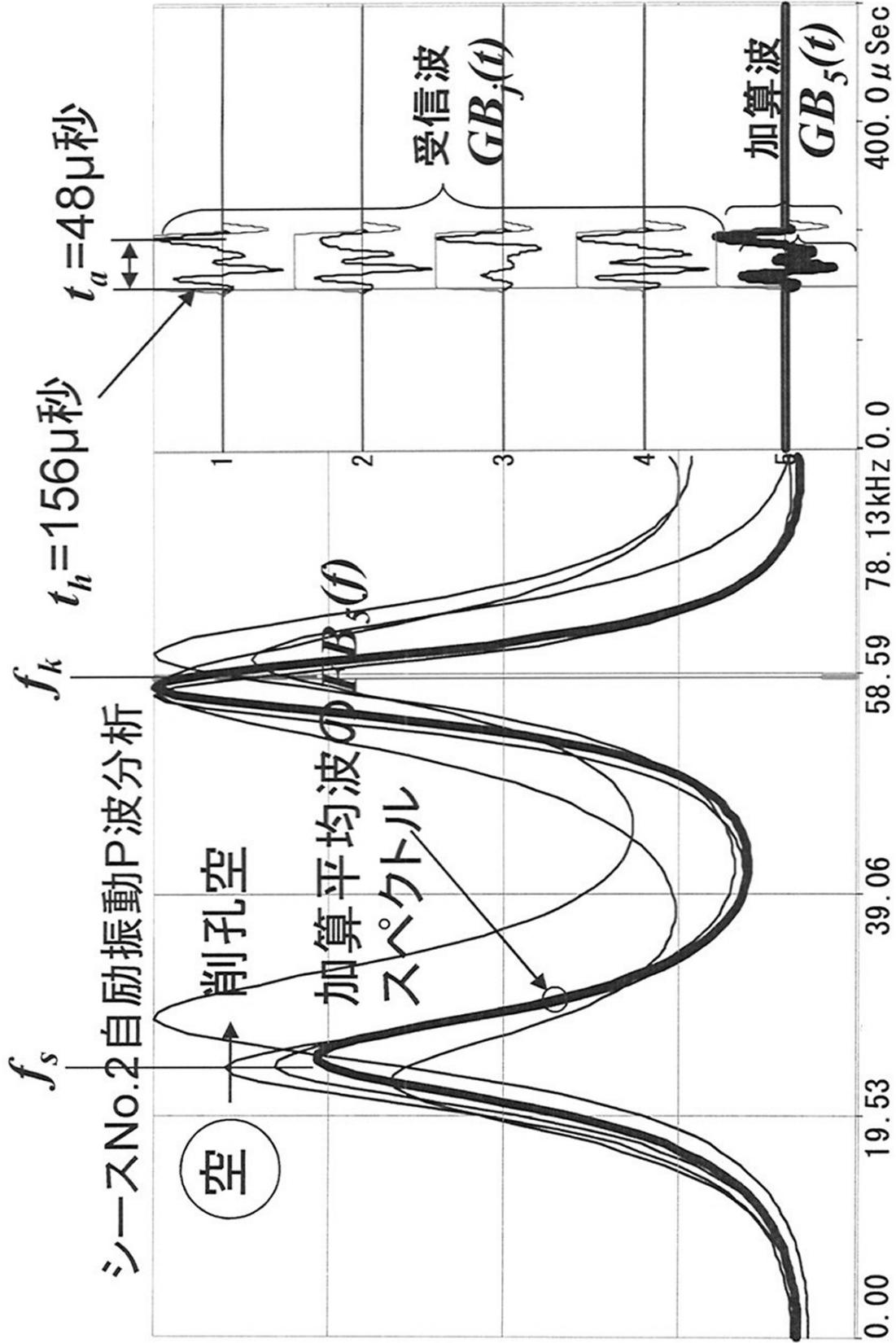
【図57】



【図58】



【 図 5 9 】



 フロントページの続き

- (74)代理人 100121603
弁理士 永田 元昭
- (74)代理人 100141656
弁理士 大田 英司
- (72)発明者 廣瀬 正行
東京都新宿区西新宿3丁目17番7号 TOKビル9F 有限会社エッチアンドピーソリューション内
- (72)発明者 木下 尚宜
東京都新宿区西新宿3丁目17番7号 TOKビル9F 株式会社エッチアンドピーシステム内
- (72)発明者 原 幹夫
福井県敦賀市若泉町3番地 株式会社日本ピーエス内
- (72)発明者 濱岡 弘二
福井県敦賀市若泉町3番地 株式会社日本ピーエス内
- (72)発明者 前田 友章
東京都国分寺市光町二丁目8番地38 財団法人鉄道総合技術研究所内
- (72)発明者 田所 敏弥
東京都国分寺市光町二丁目8番地38 財団法人鉄道総合技術研究所内
- (72)発明者 谷村 幸裕
東京都国分寺市光町二丁目8番地38 財団法人鉄道総合技術研究所内
- (72)発明者 曾我部 正道
東京都国分寺市光町二丁目8番地38 財団法人鉄道総合技術研究所内
- (72)発明者 柏原 茂
大阪府大阪市北区芝田二丁目4番24号 西日本旅客鉄道株式会社内
- (72)発明者 野村 倫一
大阪府大阪市北区芝田二丁目4番24号 西日本旅客鉄道株式会社内

審査官 波多江 進

- (56)参考文献 特開2007-139788(JP,A)
特開2005-148061(JP,A)
特開2009-047679(JP,A)
原幹夫 他, 広帯域超音波探査法を用いたPCグラウトの充填度測定, 第12回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 2003年 9月25日, pp.61-64
築山有二 他, 受発信子間隔が広帯域超音波反射法の判定精度に及ぼす影響, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 2010年 8月 5日, V-220, pp.439-440
湯間謙次 他, 広帯域超音波法を用いたPC構造物のグラウト充填状況確認調査, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, 2010年 8月 5日, V-224, pp.447-448

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 29/00 - 29/52
JSTPlus(JDreamIII)