

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2006年5月26日 (26.05.2006)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2006/054352 A1

- (51) 国際特許分類⁷: G01N 29/00
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2004/017240
- (22) 国際出願日: 2004年11月19日 (19.11.2004)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 株式会社エッチアンドビーシステム (H&B SYSTEM CO.LTD) [JP/JP]; 〒1600023 東京都新宿区西新宿3丁目17番7号 TOKビル9F Tokyo (JP). 学校法人日本大学 (NIHON UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒1028275 東京都千代田区九段南4丁目8番24号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 廣瀬 正行 (HIROSE, Masayuki) [JP/JP]; 〒1600023 東京都新宿区西新宿3丁目17番7号 TOKビル9F 株式会社

エッチアンドビーシステム内 Tokyo (JP). 安達 洋 (ADACHI, Hiromi) [JP/JP]; 〒1028275 東京都千代田区九段南4丁目8番24号 学校法人日本大学内 Tokyo (JP). 中西 三和 (NAKANISHI, Mitsukazu) [JP/JP]; 〒1028275 東京都千代田区九段南4丁目8番24号 学校法人日本大学内 Tokyo (JP). 木下 尚宜 (KINOSHITA, Takanori) [JP/JP]; 〒1600023 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ビーシステム内 Tokyo (JP). 今井 敦 (IMAI, Atsushi) [JP/JP]; 〒1600023 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ビーシステム内 Tokyo (JP).

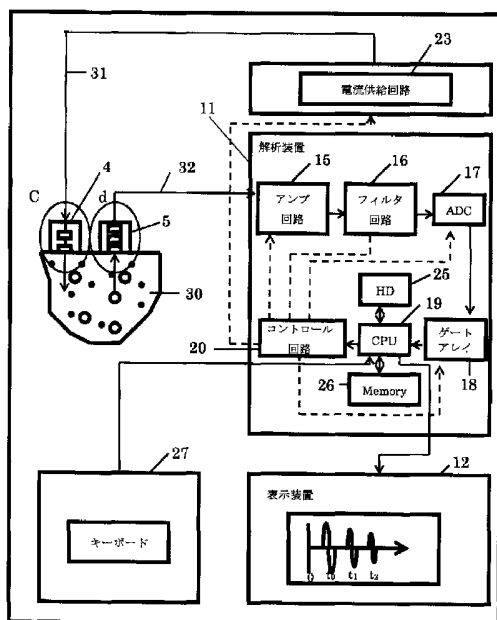
(74) 代理人: 高橋 敏忠, 外 (TAKAHASHI, Toshitada et al.); 〒1050003 東京都港区西新橋二丁目13番3号 藤喜ビル Tokyo (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,

/ 続葉有 /

(54) Title: COMPRESSION STRENGTH MEASURING METHOD AND INSTRUMENT OF CONCRETE STRUCTURE

(54) 発明の名称: コンクリート構造物の圧縮強度測定方法及び測定装置



- 23.. CURRENT SUPPLY CIRCUIT
11.. ANALYZER
15.. AMPLIFIER CIRCUIT
16.. FILTER CIRCUIT
18.. GATE ARRAY
20.. CONTROL CIRCUIT
27.. KEYBOARD
12.. DISPLAY

(57) Abstract: A method for non-destructively measuring concrete strength easily and quickly on a measuring site with high precision. A wideband ultrasonic wave is originated from an origination probe provided in a concrete model, waves received by a receiving probe are averaged arithmetically, a receiving wave thus acquired is multiplied by a predetermined time function and a specific part is clipped, the clipped wave is subjected to Fourier transform analysis or maximum entropy analysis to determine a spectrum, the frequency indicative of the position of maximum value of that spectrum is determined, a linear regression equation of the frequency and compression strength at a position showing the maximum value of spectrum is determined, a frequency indicative of the position of the maximum value of spectrum is determined for the concrete to be measured, and the compression strength is determined from the linear regression equation.

/ 続葉有 /



BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG,

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約:

本発明は、コンクリート強度を、測定現場で、容易かつ迅速に高精度で非破壊測定することを目的とする。

本発明は、コンクリートモデルに設けた発信探触子から広帯域超音波を発信し、受信探触子で受信した受信波を加算平均し、取得された受信波に予め定義された時刻関数を乗じて特定の部分を切り出し、切り出された波にフーリエ変換分析或いは最大エントロピー分析を行ってスペクトルを求め、このスペクトルの極大値を示す位置の振動数を決定し、スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度との線形回帰式を決定しておき、測定対象のコンクリートについてスペクトルの極大値の位置を示す振動数を求め、前記線形回帰式から圧縮強度を決定するものである。

明 細 書

コンクリート構造物の圧縮強度測定方法及び測定装置

技術分野

- [0001] 本発明はコンクリート構造物の柱、梁、壁などのコンクリート圧縮強度を、超音波を用いて、現場計測で即時に行う技術に関する。

従来の技術

- [0002] コンクリート構造物の保守、保全を考える場合、当該構造物のコンクリート強度の確認は必須の点検調査事項である。

従来のコンクリートの圧縮強度推定には、

- (1) 当該コンクリートよりシリンダー状のコンクリートをコア抜きし、これを供試体とし、圧縮破壊試験する方法、
 - (2) 非破壊的に圧縮強度を推定するシュミットハンマーによる打撃試験、
- が一般的であった。

- [0003] 上記(1)の方法は、コア抜きの後、抜きとったシリンダー状供試体を試験場に持ち込み、アムスラー試験機などにより、破壊試験を行うものである。しかし、圧縮強度の推定までに多くの時間、労力及び費用が必要になる、という問題を具備している。

上記(2)の方法は、計測現場で即時に圧縮強度を推定できるとしているが、その推定値の精度が劣悪なことが指摘されている。

- [0004] このような状況下、計測対象コンクリートの超音波計測器で得る音速と圧縮強度とを関連付けて、コンクリート圧縮強度を測定する方法論の確立研究(例えば、特許文献1〜3)が、近時15年程度に亘り、多くの諸賢により行われてきている。

しかしながら、以下の理由で実用化に至っていない。

- (1) コンクリートの音速と圧縮強度は確かに相関している。しかしながら、強度の変化に対する音速値の変化量が小さい。

- (2) 理由(1)に関連して、コンクリート音速値を高精度に求める必要がある。しかしながら、現状の超音波測定装置を用いた場合、音速値の測定誤差がコンクリート音速値の変化量と同程度となってしまうか、或いは、音速値の測定誤差が又はコンクリ

ート音速値の変化量よりも大きい場合がある。

- [0005] 上述した理由から、現時点において、コンクリート強度を非破壊で、測定現場で即時に、容易に、迅速に、高精度に、そして安価に計測可能な測定機器は存在しない。

特許文献1:特開2002-55092号公報

特許文献2:特開2003-14712号公報

特許文献3:特開2003-28844号公報

発明の開示

発明が解決しようとする課題

- [0006] 本発明は上述した従来技術の問題点に鑑みて提案されたものであり、コンクリート強度を非破壊で、測定現場で、即時に、容易に、迅速に、高精度に、そして安価に計測可能な測定方法及び測定装置の提供を目的としている。

課題を解決するための手段

- [0007] 発明者は、種々研究の結果として、超音波計測で得る受信超音波に含まれる物理量は、前記音速値のみではなく、他にも多くの物理量が含まれていることに着目した。そして、係る多くの物理量の中から、コンクリートの圧縮強度との相関が音速値より格段に大きい物理量を選定し、この物理量と圧縮強度との関係(以下、「関係A」と記載する)を特定し、計測対象コンクリートでの超音波受信波で得る前記物理量を前記関係Aとを対比させることでコンクリート圧縮強度を推定出来ることを見出した。

本発明は、係る知見に基いて創作されたものである。

- [0008] 本発明のコンクリートの圧縮強度測定方法は、コンクリートモデル(シリンダーモデル:図5)に設けた発信探触子(4)から広帯域超音波を複数回発信し、広帯域超音波を発信する度毎に受信探触子(5)で受信し、受信された受信波を加算平均する受信波取得工程(ステップS1、S21)と、

受信波取得工程で取得された受信波($G_{i,j}(t)$)に予め定義された時刻関数($FiLT(t)$ 、 $FiLTa(t)$ 、 $FiLTb(t)$)を乗じて特定の部分を切り出し、切り出し波($GA_{i,j}(t)$)を取得する切り出し波取得工程(ステップS2、S22)と、

切り出し波取得工程で取得された切り出し波にフーリエ変換分析或いは最大エント

ロピー分析を行い、スペクトル($FA_{ii,j}(f)$ 、 $SA_{ii,j}(f)$)を求めるスペクトル取得工程(ステップS2、S22)と、

スペクトル取得工程で求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数(f_c)を決定する極大値位置振動数決定工程(ステップS2、S22)と、

スペクトルを求めたコンクリートモデルの圧縮強度(σ_c)を(例えば、アムスラー試験機により圧縮破壊強度計測により)計測する圧縮強度計測工程、とを含み、

設計強度の異なる複数のコンクリートモデルについて、前記受信波取得工程、切り出し波取得工程、スペクトル取得工程、極大値位置振動数決定工程、圧縮強度計測工程を繰り返し、前記複数のコンクリートモデルの各々における前記スペクトルの極大値を示す位置の振動数(f_c)と圧縮強度(σ_c)から、スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度との線形回帰式(図9、図38)を決定する工程(ステップS3、S23)と、

圧縮強度を求めたいコンクリートより前記コンクリートモデルと同一形状のモデル(シリンダーモデル:図5)を成形し、圧縮強度を求めたいコンクリートのモデルに対して前記受信波取得工程(ステップS11、S31)、切り出し波取得工程、スペクトル取得工程、極大値位置振動数決定工程を行い、求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数(f_k)と前記線形回帰式から圧縮強度を求めたいコンクリートの圧縮強度を決定する工程(ステップS12、S32)

とを有することを特徴としている(請求項1)。

[0009] また、本発明のコンクリート構造物の圧縮強度測定方法は、コンクリートモデル(図20、図21:ステップS40)に設けた発信探触子(4)から広帯域超音波を複数回発信し、広帯域超音波を発信する度毎に前記受信探触子(5)で受信し、受信された受信波を加算平均する受信波取得工程(ステップS41)と、

受信波取得工程で取得された受信波($G_{ii,ii,j}(t)$)に、前記発信探触子と前記受信探触子との相対的な位置関係(図19の計測法における探触子の位置、探触子間距離)とコンクリートモデルの厚さ(D)とにより形状が定義される時刻関数($FiLT(t)$ 、 $FiLTa(t)$ 、 $FiLTb(t)$)を乗じて特定の部分を切り出し、切り出し波($GA_{ii,ii,j}(t)$)を取得する切り出し波取得工程(ステップS42-1、S42-2)と、

切り出し波取得工程で取得された切り出し波にフーリエ変換分析或いは最大エントロピー分析を行い、スペクトル($FA_{ii, il, j}(f)$ 、 $SA_{ii, il, j}(f)$)を求めるスペクトル取得工程(ステップS42-1、S42-2)と、

スペクトル取得工程で求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数(f_c)を決定する極大値位置振動数決定工程(ステップS42-1、S42-2)と、

スペクトルを求めたコンクリートモデルの圧縮強度(σ_U)を計測(例えば、図41のようにコア抜きしたコンクリートモデルをアムスラー試験機等を用いた破壊挟持試験で計測する)する圧縮強度計測工程(ステップS43)、とを含み、

設計強度と厚さとが異なる複数($n_F \times n_E$ 種類の)のコンクリートモデルについて、発信探触子及び受信探触子のコンクリートモデルへの取付位置の相対位置関係(図19の計測法における探触子の位置、探触子間距離)を同一にして、同一の計測法(図19の計測法)により受信波を取得するという条件下で、前記受信波取得工程、切り出し波取得工程、スペクトル取得工程、極大値位置振動数決定工程、圧縮強度計測工程を繰り返し、前記複数のコンクリートモデルの各々における前記スペクトルの極大値を示す位置の振動数(f_c)と圧縮強度(σ_U)から、スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度との線形回帰式(図9、図38)を決定する工程(ステップS43)と、

圧縮強度を求めたいコンクリート構造物に発信探触子及び受信探触子を取り付け、発信探触子と受信探触子の取付位置の相対位置関係(図19の計測法における探触子の位置、探触子間距離)は前記コンクリートモデルに取り付けた場合と同一にして、前記コンクリートモデルで受信したのと同じの計測法(図19の計測法)により受信波を取得する様にせしめ、圧縮強度を求めたいコンクリート構造物の発信探触子及び受信探触子の取付位置とコンクリート厚さから(表5の数値を用いて)時刻関数の形状を定義し(ステップS52)、圧縮強度を求めたいコンクリート構造物に対して前記受信波取得工程、切り出し波取得工程、スペクトル取得工程、極大値位置振動数決定工程を行い、求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数(f_k)と前記線形回帰式から圧縮強度を求めたいコンクリート構造物の圧縮強度を決定する工程、

とを有することを特徴としている(請求項2)。

[0010] 本発明(請求項2の発明)のコンクリート構造物の圧縮強度測定方法において、切り出し波取得工程(ステップS42-1、S42-2)で受信波から切り出される前記特定の部分は表面波であり(図19(d)の計測法)、前記時刻関数は前記相対位置毎に予め形状が定義されている様に構成することが出来る(請求項3)。

[0011] 本発明のコンクリートの圧縮強度測定装置は、広帯域超音波を発信する発信探触子(4)と、広帯域超音波を受信する受信探触子(5)と、記憶ユニット(ハードディスク25)と、受信された広帯域超音波を処理する処理ユニット(CPU19、コントロール回路20)とを有しており、該処理ユニットは、

受信探触子(4)で受信された受信波を加算平均して受信波($G_{ii,j}(t)$)を取得し、取得された受信波に予め定義された時刻関数($F_iLT(t)$ 、 $F_iLTa(t)$ 、 $F_iLTb(t)$)を乗じて特定の部分を切り出して、切り出し波($GA_{ii,j}(t)$)を取得し、

取得された切り出し波にフーリエ変換分析或いは最大エントロピー分析を行い、スペクトル($FA_{ii,j}(f)$ 、 $SA_{ii,j}(f)$)を求め、

求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数(f_c)と、スペクトルを求めたコンクリートモデル(シリンダーモデル:図5)の圧縮強度(σ_u)とを記憶し、設計強度の異なる複数のコンクリートモデルにおける前記スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度から、スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度との線形回帰式(図9、図38)を決定して記憶ユニットに記憶し、

圧縮強度を求めたいコンクリートについて、前記コンクリートモデルに対するのと同じの処理を行い、求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数(f_k)と、記憶ユニットに記憶された前記線形回帰式から、圧縮強度を求めたいコンクリートの圧縮強度を決定する、

制御を行う様に構成されていることを特徴としている(請求項4)。

[0012] また、本発明のコンクリート構造物の圧縮強度測定装置は、広帯域超音波を発信する発信探触子(4)と、広帯域超音波を受信する受信探触子(5)と、記憶ユニット(ハードディスク25)と、受信された広帯域超音波を処理する処理ユニット(CPU19、コントロール回路20)とを有しており、該処理ユニットは、

受信探触子で受信された受信波($G_{ii,ii,j}(t)$)に、前記発信探触子と前記受信探触

子との相対的な位置関係(図19の計測法における探触子の位置、探触子間距離)とコンクリートモデルの厚さ(D)とにより形状が定義される時刻関数($FiLT(t)$ 、 $FiLTa(t)$ 、 $FiLTb(t)$)を乗じて特定の部分を切り出して、切り出し波($GA_{ii, i1, j}(t)$)を取得し、

取得された切り出し波にフーリエ変換分析或いは最大エントロピー分析を行い、スペクトル($FA_{ii, i1, j}(f)$ 、 $SA_{ii, i1, j}(f)$)を求め、

設計強度と厚さとが異なる複数のコンクリートモデル($n_F \times n_E$ 種類の)について、発信探触子及び受信探触子のコンクリートモデルへの取付位置の相対位置関係(図19の計測法における探触子の位置、探触子間距離)を同一にして、同一の計測法(図19の計測法)により受信波を取得するという条件下で、前記複数のコンクリートモデルの各々について求めた前記スペクトルの極大値を示す位置の振動数(f_c)と圧縮強度(σ_U)から、スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度との線形回帰式(図9、図38)を決定して記憶ユニットに記憶し、

圧縮強度を求めたいコンクリート構造物には、発信探触子と受信探触子の取付位置の相対位置関係(図19の計測法における探触子の位置、探触子間距離)を前記コンクリートモデルと同一にして、前記コンクリートモデルで受信したのと同じ計測法(図19の計測法)により受信波を取得する様に発信探触子及び受信探触子を取り付けられており、圧縮強度を求めたいコンクリート構造物の発信探触子及び受信探触子の取付位置とコンクリート厚さから(表5の数値を用いて)受信波を切り出す時刻関数の形状を定義し、圧縮強度を求めたいコンクリート構造物に対して前記コンクリートモデルに対するのと同じ処理を行い、求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数(f_k)と、記憶ユニットに記憶された圧縮強度を求めたいコンクリート構造物の厚みと同一厚さの前記線形回帰式とから、圧縮強度を求めたいコンクリート構造物の圧縮強度を決定する、

制御を行う様に構成されていることを特徴としている(請求項5)。

[0013] 本発明(請求項6の発明)のコンクリート構造物の圧縮強度測定装置において、発信探触子(4)と受信探触子(5)に代えて、広帯域音波を発信する機能と受信する機能を共有する探触子(33)を有して構成することが出来る。

- [0014] そして、本発明（請求項7の発明）のコンクリート構造物の圧縮強度測定装置において、受信波から表面波を切り出し（図19(d)の計測法）、該切り出しで用いられる時刻関数は前記相対位置毎に予め形状が定義されている様に構成することが出来る。

発明の効果

- [0015] 本発明による超音波測定装置を用いれば、このコンクリート強度の計測を安価に、容易に、そして迅速に行う事が出来る。また、測定者の技術力による強度測定値の変動を排除できる。

より具体的には、本発明によれば、受信超音波に含まれる縦波、横波、縦波と横波の重畳波又は表面波の持つ物理量（振動数、スペクトル幅、又はスペクトル面積etc.）とコンクリート強度との関係（関係A）、又は、前記物理量とコンクリート劣化度（含む、中性化）との関係（関係B）を見出すことが出来る。

- [0016] さらに、計測対象コンクリートでの受信超音波より抽出される前記物理量との関係A、又は関係Bとの対比の中で、それぞれコンクリート圧縮強度又はコンクリート劣化度（含む、中性化）を推定できる。

発明を実施するための最良の形態

- [0017] 以下、添付図面を参照して、本発明の実施形態における装置について具体的に説明する。

図1は本発明の実施形態に係る超音波装置を示すブロック図である。

被探知体30の表面に、発信探触子4と受信探触子5が接触するように配置される。そして、発信探触子4には超音波発信装置の電流供給回路23から電流が供給され、発信探触子4から超音波（広帯域超音波）が発信し、被探知体30内に入射する。

受信探触子5が受信した超音波信号は、解析装置11に入力されて、後述のようにして解析される。

- [0018] この解析装置11においては、受信探触子5の受信信号がアンプ回路15により増幅されて、フィルタ回路16により後述の如くしてフィルタリングを受けた信号が、ADC（アナログデジタル変換回路）17によりデジタル信号に変換され、ゲートアレイ18を介してCPU（中央演算装置）19に入力される。

HD（ハードディスク）25には、解析処理アプリケーションソフトウェアとCPU19により

演算処理された時系列データが保存される。

解析装置11による解析結果は、表示装置12にも入力されて表示される。更に、必要な情報がキーボード27からCPU19に入力されるようになっている。

- [0019] メモリ26は、CPU19が演算する際にデータを一時的に格納するために使用される。また、CPU19からコントロール回路20に制御信号が出力され、コントロール回路20はアンプ回路15、フィルタ回路16、ADC17、ゲートアレイ18及び電流供給回路23に作動指令信号を出力する。

電流供給回路23は同軸ケーブル31を介して発信探触子4に接続されている。

- [0020] 図3に示すように、発信探触子4には、基盤化したステップ型電圧発生器13と振動子28とが内蔵されている。

ステップ型電圧発生器13には、図2に示すように、ステップ電圧駆動回路21及びステップ電圧発生回路22が設けられており、ステップ電圧駆動回路21で発生するステップ関数型電圧を振動子28(図3)に印加する。

- [0021] 超音波を被探知体30に入力する都度、受信探触子5で受信波を得る。この受信波は同軸ケーブル32を介して、解析装置11のアンプ回路15へ、電圧の時間変動データとして送られる。

アンプ回路15へ送られた前記時間変動データはフィルタ回路16を経由して、ADC17に達する電圧のアナログ量がADC17によりデジタル量に変換され、ゲートアレイ18を介してCPU19に転送され、前記電圧デジタル値(ADC17によりデジタル量に変換された電圧値)の時刻歴が表示装置12に表示される。

自動的に、又はキーボード27を用いた外部からの指示により、電圧の増幅又は減幅及びローパス／ハイパスフィルタ処理の指令がCPU19に伝達され、CPU19はコントロール回路20を介してアンプ回路15及びフィルタ回路16を制御する。

- [0022] 図4に示すように、受信探触子5には、100kHz〜300kHzの範囲の特性の振動数における漸減型ハイパスフィルタ24、アンプ回路14及び振動子29が内蔵されている。

電流供給回路23はコントロール回路20により制御されて、所定の時間間隔で動作する。これにより、発信探触子4(図3)に内蔵された振動子28から、前記所定の時間

間隔で超音波が被探知体30に入射される。受信探触子5(図4)に内蔵された振動子29は超音波が入力する都度、被探知体30の音圧変化にともない振動が励起する。この振動励起で振動子29に生じる電圧の時間変化が、受信探触子5内のフィルタ回路24及びアンプ回路14で1次処理される。

[0023] アンプ回路15及びフィルタ回路16の制御が終了した段階で、CPU19(図1)の指示でコントロール回路20が動作し、ゲートアレイ18に受信波の加算処理を命令する。ゲートアレイ18は、ADC17で得られる電圧に関する時刻歴デジタル量を、前記時刻歴を得る都度、指定回数加算する。そして、CPU19のコントロール下加算平均時刻歴を作成し、表示装置12にその時刻歴をリアルタイム表示する。

[0024] ハイパスフィルタ及びアンプ回路は夫々受信探触子5と解析装置11の双方に内蔵されている。受信探触子5に内蔵されているハイパスフィルタ24及びアンプ回路14は受信波に対し、前述の如く、1次処理を行うものである。それに対して、解析装置11に内蔵されるアンプ回路15とフィルタ回路16は、1次処理された受信波に対し、CPU19のコントロール下で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とされるものであり、解析装置11内のアンプ回路15とフィルタ回路16は必須のものではない。

[0025] 図1の超音波装置は、1対の発信探触子4と受信探触子5を装備する2探触子の場合を示している。しかし、発信探触子4と受信探触子5を一緒にした1探触子としてもかまわない。

発信探触子4と受信探触子5を一緒にした1探触子の場合、図42で示す様に、発信／受信共用探触子33の中にステップ型電圧発生器13と漸減型ハイパスフィルタ24とアンプ回路14を共存させ、振動子34を超音波の発信／受信の双方で用途で使用するようになる。

[0026] ここで、図10を参照して、発信探触子4から発信される広帯域超音波について、説明する。

パルス型電圧が印加されるセラミック振動子から発信される超音波は、図10(b)で示す様に、比較的狭い帯域のスペクトルを持つので、本発明の計測では使用に適さない。

これに対して、図示の実施形態及び実施例で発信探触子4から発信される広帯域超音波(例えば、ステップ型電圧が印加されるセラミック振動子)は、図10(a)で示す様に、広い帯域のスペクトルを持つ超音波が得られる。この様な、広い帯域のスペクトルを持つのが広帯域超音波である。

実施例

[0027] 次に、本発明の第1実施例(以下、「実施例1」)について説明する。

「実施例1の前処理の具体的分析事例」

図5のコンクリートシリンダーモデルを用いた計測の受信波の事例の1つを図11に示す。図11で示す事例は、設計コンクリート強度を $10\text{N}/\text{mm}^2$ とした同一形状の3個のシリンダーモデルでの計測波を比較表示したものである。径40mm、共振振動数500kHzの振動子を内蔵した発信及び受信探触子を図5に示す様に配置し、発信探触子内振動子に30Vのステップ関数型電圧を印加することで、広帯域超音波をシリンダーモデル端面より入力し、他端面の受信探触子で広帯域超音波を受信する計測で得た比較波 $G_j(t)$ ($j=1\sim 3$)である。

[0028] ここで、図11の受信波は、シリンダーモデル特有の形となっている。図12を用いて説明する。

シリンダーに生ずる伝達波が図12に示されており、波201は発信子から受信子まで最短距離で伝達する縦波である。波202は、シリンダー内部に無数にある細石とセメント材との境界でモード変換(縦波が横波に又は横波が縦波に変化)を繰り返しながら伝達する波である。

波203'は、シリンダー軸方向に超音波を入力する時、シリンダー端部(図12では左側端面)表面に自然発生する表面波である。波203'は円周方向に全方位に向って伝達し、円周上でその伝達方向をシリンダーの中心軸方向に変じ、シリンダー表面を伝達する波(203)となる。このシリンダー表面を伝達する波203がシリンダーの他端面(図12では右側端面)に伝達され、当該他端面において、波203は波203'に変じ、受信探触子で受信される。

波201、202、203'の受信波を、時間軸上で模式的に示せば図13のようになる。

[0029] 図11のカーソル位置110に生ずる最初の起生波(縦波201)を、図7(b)で示す時

刻関数を用いて切り出した時のスペクトル比較図を、図14に示す。

図14では、各波及び各スペクトルのシリンダー番号を符号1、2、3で示している。設計コンクリート強度が $10\text{N}/\text{mm}^2$ である3つのシリンダーモデルにおけるスペクトルの極大値を示す振動数を求め、これ等の平均値を対比させると表1が得られる。

表1. 201波の振動数

シリンダー番号	振動数 (kHz)	振動数平均	振動数／同平均
1	108.7	109.7kHz	99%
2	113.7		104%
3	106.6		97%

[0030] 表1によれば、各シリンダーでの振動数は、3つのシリンダーの振動数の平均値に対して1%～4%の差が生じているが、係る差異は、振動数とコンクリート強度の対比を行う上では許容される範囲である(詳細は、後述する)。

なお、図14において、符号1、2、3で表示するスペクトル形状は全く相似している。

[0031] 一方、図15は、図13から波202、波203'を切り出したスペクトル比較図である。図15で示されている3つのスペクトルは全く相似しており、2つの極大値を持っている。

低周波の極大値に注目し、その振動数を読み取ると、表1に対応して表2を得る事ができる。

表2. 202波と203'の重畳波の振動数

シリンダー番号	振動数 (kHz)	振動数平均	振動数／同平均
1	52.5	53.0kHz	99.0%
2	52.8		99.6%
3	53.8		101.5%

[0032] 表2における振動数の微小な変動は、表1の場合と同様、振動数とコンクリート強度との対比を行う上で許容される値である。

前記波202、波203'の重畳波 $GA_i(t)$ の具体的切り出しは、図7の時刻関数 $FILTb(t)$ (TGCフィルタ)tgを用いている。採用したtg、 Δt 、 ta は、
 $tg=67\mu\text{秒}$ 、 $\Delta t=400$ 、 $ta=40\mu\text{秒}$
 とし、

$$t < (t_g - \Delta t) : \text{FiLTb}(t) = 0$$

$$t_g - \Delta t \leq t < t_g : \text{FiLTb}(t) = \sin \frac{\pi}{2} \times \left(\frac{t - (t_g - \Delta t)}{\Delta t} \right) \quad \dots \text{式Z-1}$$

$$t_g \leq t \leq t_g + t_a : \text{FiLTb}(t) = 1.0$$

$$t_g + t_a < t \leq t_g + t_a + \Delta t : \text{FiLTb}(t) = \sin \frac{\pi}{2} \left(\frac{t_g + t_a + \Delta t - t}{\Delta t} \right) \quad \dots \text{式Z-2}$$

$$t > t_g + t_a + \Delta t : \text{FiLTb}(t) = 0.0$$

N5=1000として、

$$GA_j(t) = \text{FiLTb}^{n5}(t) \cdot G_j(t) \quad \dots \text{(式A-1)}$$

の様に計算する。

これより、図15のスペクトルは、

$$FA_j(f) = \int_{-\infty}^{\infty} (GA_j(t) \cdot e^{-i\omega t}) df \quad \dots \text{式A-2}$$

として求める。

[0033] ところで、図15のスペクトル $FA_j(f)$ を(A-2)式のフーリエ変換ではなく、最大エントロピー法に置き変えると、下式(A-3)の $SA_j(f)$ を求めることができる。この $SA_j(f)$ を用いれば、更に明解なスペクトル比較図を図16に示すように得る事ができる。

$$SA_j(f) = \frac{P_m \cdot \Delta t^i}{\left| 1 + \sum_{j1=1}^m a_{m,j1} \cdot e^{-i\omega \cdot j1 \times \Delta t^i} \right|} \quad \dots \text{式A-3}$$

ここで

m は、仮定した自己回帰モデルの次数、

Δt は、受信波収録に当たっての時間間隔、

P_m は、定常白色雑音の m 次の分散、

$a_{m,j1}$ は、次数 m における自己回帰係数であり、 $a_{m,1}$ 、 $a_{m,2}$ 、 $\dots$ 、 $a_{m,m}$ となり、

i は虚数表示を示す。

[0034] 図16のスペクトル $SA_j(f)$ の比較図は、最大エントロピー法を適用する $GA_j(f)$ 波を

縦波201として求めている。また、この $GA_j(f)$ 波を波201、波202、波203'の混合波とし、分析のデータ長(分析波の時間)を長くした場合のスペクトル比較図 $SA_j(f)$ を図17に示す。

[0035] 図16、図17で波の切り出し用TGCフィルタ($FiLTb(t)$)を、符号「TGC」で示している。このTGCを時間軸前方又は後方へ若干移動すると、図16、図17共に、スペクトル極大値を与える振動数も微小量変化する。

しかしながら、分析波の時刻長を長くした図17の方が、振動数の変化量が少なくなり、図示の分析例では殆んど変動していない。このことは、コンクリート強度と前記振動数を関連づける上で好都合な現象の1つと云える。

[0036] 図5のコンクリートシリンダーを計24体作成し、図14に示した縦波(201)の切り出し及び図15によるモード変換波(202)とシリンダー表面を伝達する波203'(横波:表面波を含む)との混合波の切り出しによるスペクトル極大値を与える振動数を求めた後、アムスラー試験機による破壊試験を前記24体について行った。

24体の設計強度の内訳は、 $10N/mm^2$ 、 $18N/mm^2$ 、 $24N/mm^2$ 、 $27N/mm^2$ 、 $33N/mm^2$ 、 $36N/mm^2$ 、 $45N/mm^2$ 、 $60N/mm^2$ の8種類とし、それぞれの設計強度で3体作成し、計 $3 \times 8 = 24$ 体での前記振動数の特定とこれ等の結果を整理して、前記破壊試験を行った。

[0037] 表3に破壊試験で得られたコンクリート強度とスペクトル極大値(最大値)の振動数を示す。

表3. コンクリート強度とスペクトル極大値（最大値）の振動数

	最大荷重 Pu(kN)	コンクリート強度 (圧縮応力度 σ_u) (N/mm ²)	縦波音速 V_p (m/s)	スペクトル極大値の振動数 (kHz)	
				縦波 f_{C1}	(モード変換波 + 表面波) f_{C3}
Fc10-1	129.4	16.5	4466	108.7	52.5
Fc10-2	127.4	16.2	4423	113.7	52.8
Fc10-3	133.8	17.0	4382	106.6	53.8
Fc18-1	248.0	31.6	4424	111.0	55.8
Fc18-2	254.5	32.4	4509	117.1	55.8
Fc18-3	241.0	30.7	4424	115.0	55.8
Fc24-1	315.0	40.1	4645	124.5	56.2
Fc24-2	312.0	39.7	4948	120.4	57.0
Fc24-3	322.0	41.0	4792	113.0	57.4
Fc27-1	371.0	47.3	5161	130.5	60.5
Fc27-2	351.5	44.8	5104	124.5	59.5
Fc27-3	374.9	47.8	5104	130.5	59.5
Fc33-1	370.0	47.1	4740	118.4	61.9
Fc33-2	370.0	47.1	4994	121.8	61.9
Fc33-3	380.1	48.4	4740	129.8	62.7
Fc36-1	444.0	56.6	5078	138.6	63.1
Fc36-2	432.0	55.0	5058	133.9	62.6
Fc36-3	438.0	55.8	5181	129.8	62.4
Fc45-1	502.0	63.9	4869	160.1	64.2
Fc45-2	516.5	65.8	4856	147.3	64.1
Fc45-3	478.0	60.9	4892	138.6	64.9
Fc60-1	556.5	70.9	5225	138.6	63.2
Fc60-2	554.0	70.6	5225	144.6	63.2
Fc60-3	580.5	73.9	5082	152.7	63.1

[0038] 表3は、各コンクリートシリンダー (Fc**k) 毎にアムスラー試験機によるコンクリート強度 (N/mm²) とスペクトル極大値の振動数を対比したものである。

ここで、「Fc**k」の「**」は、設計強度である。また、同一設計強度のシリンダーを3体作成しており、「k」はその番号で1～3となる。

参考までに、図6の縦波起生時刻 t_p より、音速 V_p を考慮して、次の式

$$V_p = 200 (\text{mm}) / t_p$$

で計算し、表3の1項目を得ている。

[0039] 表3の結果より、振動数 f_{C1} 又は f_{C3} と圧縮応力度 σ_u との関係を線形で示したものが図9(a) 及び図9(b) である。 σ_u と f_{C1} との関係で相関係数 r が0.9であり、 σ_u と f_{C3} との関係で相関係数 r が0.93となっている。

表3の音速値 V_p と σ_u との関係は、図18のようになる。図18によれば相関係数 r が0.8であり、図9(a)、図9(b)における相関係数 r に比較して劣った結果となっている。このことは、音速と圧縮応力度 σ_u との関連ではコンクリート強度の正確な予測が難しいことを示している。

なお、図9(a)、図9(b)、図18の α 、 β 、 r の値は(α 、 β は図18参照、 r は相関係数)、後述する「実施例1の前処理フローチャート(FFT分析)」のステップS3に関する説明で記述されている数式(2)、(3)、(4)を用いて算出される。

[0040] 「実施例1の後処理の具体的分析事例」

実施例1で、径100mm、長さ200mmで設計圧縮強度の異なる多くのコンクリートシリンダーモデルの圧縮破壊試験結果と、同モデルでの受信波の分析結果との対比で、コンクリート強度 σ_u とスペクトル極大値(最大値)を示す振動数 $fc1$ 又は $fc3$ の関係が表3のようになることを示した。そして、(1)式の線形回帰式が特定できることを前記している。

$$\sigma_u(fc) = \alpha \cdot fc - \beta \quad \dots (1)$$

[0041] この回帰式を本超音波装置のHD(ハードディスク)25(図1参照)に保存しておき、装置起動時にCPU19のコントロール下でMEMORY26に転送する。コンクリート圧縮強度の不明なコンクリートシリンダーモデルの前記強度を計測したい場合、当該シリンダーモデルで図12に示す計測を行って得る受信波 $G(t)$ に、図14又は図15のスペクトル $FA_j(f)$ を得たのと同じ分析処理を行えば、スペクトル $FA(f)$ の極大値(最大値)を示す振動数 fk が図14の fc 又は図15の fc に対応して得られる。

この振動数 fk を図14で示す結果を得た分析と同一処理で求め、図9(a)の線形回帰式に振動数 fk を当て嵌めれば、図38に示す様にコンクリート圧縮強度が予測できる。

また、この振動数 fk を図15で示す結果を得た分析と同一処理で求め、図9(b)の線形回帰式に振動数 fk を当て嵌めれば、前記と同様にコンクリート圧縮強度が予測できる。

[0042] 実施例1において、図14、図15の $FA(f)$ スペクトル比較図の代わりに、前述したA-3式の最大エントロピー法分析による $SA_j(f)$ スペクトルの比較図を図16、図17に示

す。

このSA_j(f)スペクトルを、多数の設計強度の異なるシリンダーモデルを用いて、前記図16、図17を求めた場合と同一の分析条件で求め、得られるfc値と対応する圧縮強度の値との関係より、図9に対応する線形回帰式(但し、図38に対応:図示せず)を求めることができる。

[0043] 当然、図16を得た分析法に対応する線形回帰式と、図17を得た分析法に対応する線形回帰式が別々に得られる。この回帰式を本超音波装置のHD25に保存しておき、装置起動時にCPU19のコントロール下でMEMORY26に転送する。

そして、コンクリート圧縮強度の不明なコンクリートシリンダーモデルの前記強度を計測したい場合、当該シリンダーモデルで図12に示す計測を行って得る受信波G(t)に、図16又は図17のスペクトルSA_j(f)を得たと同一の分析処理を行えば、スペクトルSA(f)の極大値(最大値)を示す振動数fkが、図16のfc又は図17のfcに対応して得られる。

図38で模式的に示す線形回帰式にこの振動数F_Kを当て嵌めれば、前記と同様、コンクリート圧縮強度を図38の縦軸における「*」印位置を読み取ることで、予測することができる。

[0044] 以下、実施例1について、図43以下のフローチャートをも参照して、「フーリエ変換分析(FFT分析)」の場合と、「最大エントロピー分析」の場合の双方について説明する。

そして、各々について、「前処理」と「後処理」を、ステップ毎に説明する。

[0045] 「実施例1の前処理フローチャート(FFT分析)」

先ず、図43を参照して、実施例1のフーリエ変換分析(FFT分析)を行う場合について、前処理を、ステップ毎に説明する。

ステップS1(図43)では、図5に示すコンクリートシリンダーモデル(設計強度No.:JB)の計測で、発信探触子101より広帯域超音波を入力し、受信探触子102で広帯域超音波を受信する。受信波G_{ii,j}(t)は、超音波発信毎に得る受信波G_{ii,k}(t)を加算平均したものである。

[0046]

$$G_{i1,j}(t) = \frac{1}{n_C} \sum_{k=1}^{n_C} G_{i1,j,k}(t) \quad \dots \text{式S1}$$

ここで、

$i1=1 \sim n_A : n_A$ は、コンクリート設計強度の数

$j=1 \sim n_B : n_B$ は、同一設計強度 ($i1$) のシリンダー本数

$k=1 \sim n_C : n_C$ は、加算平均回数

n_A 、 n_B 、 n_C は1以上の整数

である。

[0047] 次に、図43のステップS2を説明する。

ここで、上述したステップS1で得られる受信波 $G_{i1,j}(t)$ を、模式的に図6に示す。波201、波202、波203'の詳細については、前述した「実施例1前処理の具体的分析事例」の項の説明を参照されたい。

ステップS2では、図7(a)、図7(b)等の時刻関数 $FiLT(t)$ を複数回 ($n5$) 図6の $G_{i1,j}(t)$ 波に乘じ、

- (1) 縦波201、
- (2) モード変換波202、
- (3) モード変換波202と横波203' (表面波含) との重畳波、
- (4) 201、202、203' の重畳波、

の何れかを切り出す。すなわち、

$$GA_{i1,j}(t) = FiLT(t)^{n5} \cdot G_{i1,j}(t)$$

ここで、 $GA_{i1,j}(t)$ は切り出し波である。

[0048] 前記時刻関数は図7(a)、図7(b)に限定されるものではなく、前記(1)～(4)の波を切り出す事が出来るものであれば、特に限定条件は無い。また、 $FiLT(t)$ の形状を定義する Δt 、 ta 及び前記 $n5$ は、予め設定された所定値である。

なお、波 $G_{i1,j}(t)$ に時刻関数 $FiLT(t)$ を複数回 ($n5$) に亘って乗じているのは、精度向上のためである。

[0049] 前記、切り出し波 $GA_{i1,j}(t)$ をフーリエ変換し、 $FA_{i1,j}(f)$ を求め、 $j=1 \sim n_B$ で比較表示する。ここで、

$$FA_{i,j}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} (GA_{i,j}(t) \cdot e^{-i\omega t}) dt \quad \dots \text{式 S 2}$$

[0050] 縦波201をFiLTa(t)で切り出した場合のスペクトル $FA_{i,j}(f)$ 比較図が図8である。図8を視認することにより、スペクトル極大値の振動数 fc を、自動的に或いはオペレータの判断で特定する。

図8における縦波201の切り出し波のスペクトル比較図からスペクトル極大値の振動数 $fc1$ を特定するのに加えて、波202の切り出し波から振動数 $fc2$ を、波202と波203'との重畳波の切り出し波から振動数 $fc3$ を特定し、波201、202、203'の重畳波の切り出し波から振動数 $fc4$ を特定する。

[0051] 前記振動数 fc 値の特定において、前記所定値 Δt 、 ta 、 $n5$ 及び tg 値を若干変更することで、 $j=1 \sim n_B$ の各々における $FA_{i,j}(f)$ スペクトルの形状及び fc 値が概略一致してくる。すなわち、本分析STEP(ステップS3)で、スペクトルの形状及び fc 値が概略一致してくる様に所定値 Δt 、 ta 、及び $n5$ を変更することが可能である。

また、 tg は t_{h1} 、 t_{h2} 又は t_{h3} を初期値とする。但し、 tg 位置の時刻軸上での移動は可能である。

詳細は後述するが、スペクトルの形状及び fc 値が概略一致してくる様に変更或いは調節された所定値 Δt 、 ta 、 $n5$ 及び tg 値は、記憶されて後述の後処理で利用される。

[0052] ステップS2が終了した後、ステップS2Aにおいて、他の設計強度のコンクリートシリンダーについてもステップS1、S2の処理が完了したか否かを判断する。他の設計強度のコンクリートシリンダーについてステップS1、S2の処理が完了していない場合は(ステップS2AがNO)、「i1」のカウントアップを行い(ステップS2B)、ステップS1に戻る。

他の設計強度のコンクリートシリンダーについてもステップS1、S2の処理が完了している場合には(ステップS2AがYES)、ステップS3(図43)の処理を行う。

[0053] ステップS3においては、コンクリートシリンダーのナンバリングを jj で付与し直し、 jj を $1 \sim n_D$ ($n_D = n_A \times n_B : n_A, n_B$ については、ステップS1参照)の整数とする。STEP1～STEP2の繰り返し処理で得られる fc 値($fc1 \sim fc4$)を、コンクリートシリンダー jj 毎にX

jj (kHz)と表現し直す。jjコンクリートシリンダーの圧縮破壊試験で得られる破壊強度を、Yjj (N/mm²)と表現する。

圧縮強度 σ_U と前記fc値との関係を

$$\sigma_U(fc) = \alpha \cdot fc - \beta \cdots (1)$$

なる線形回帰式とし、下式(2)、(3)で α 、 β を決定する。

[0054]

$$\alpha = \frac{\sum_{jj=1}^{n_D} (X_{jj} - \bar{X})(Y_{jj} - \bar{Y})}{\sum_{jj=1}^{n_D} (X_{jj} - \bar{X})^2} \cdots \text{式 (2)}$$

$$\beta = \bar{Y} - \alpha \cdot \bar{X} \cdots \text{式 (3)}$$

また、相関係数rは、次式(4)で得られる。

$$r = \frac{1}{n_D - 1} \sum_{jj=1}^{n_D} (X_{jj} - \bar{X})(Y_{jj} - \bar{Y}) / \left\{ \sqrt{\frac{1}{n_D - 1} \sum_{jj=1}^{n_D} (X_{jj} - \bar{X})^2} \times \sqrt{\frac{1}{n_D - 1} \sum_{jj=1}^{n_D} (Y_{jj} - \bar{Y})^2} \right\} \cdots \text{式 (4)}$$

[0055] 回帰式の係数 α 、 β 、rが得られたならば、以下の線形回帰式係数表(表4)を作成し、本装置(図1)の解析装置内のハードディスク25に保存記憶させる。

表4. 回帰式係数と f_c を得た所定値 (FFT分析による)

分析波GA (t)	FILT	所定値				回帰式係数		
		Δt	t_a	n5	t_g	α	β	r
①201縦波	a	.	.	.	.	.	.	.
	b	400	50	1000	89	1.06	88.8	0.90
②202モード変換波	a	.	.	.	.	.	.	.
	b	.	.	.	.	.	.	.
③202と203波の重畳波	a	.	.	.	.	.	.	.
	b	1000	100	2000	100	4.01	193.1	0.93
④201, 202, 203の重畳波	a	.	.	.	.	.	.	.
	b	.	.	.	.	.	.	.

以上がステップS3で行われる。

[0056]

ステップS3において記載された式(2)～式(4)において、

Xjjは、シリンダーjjのfc値(fc1～fc4の何れか)、

Yjjは、シリンダーjjのアムスラー試験機による圧縮破壊強度、

である。

そして、全シリンダーjjのfc値(fc1〜fc4の何れか)の平均値は、次の符号で示されている。

$$\bar{X}$$

また、全シリンダーjjのアムスラー試験機による圧縮破壊強度の平均値は、次の符号で示されている。

$$\bar{Y}$$

なお、圧縮破壊強度は次の符号で示す。

$$\sigma_u$$

[0057] Yjj (jj = 1〜n_D) は、ステップS3で入力する。

ステップS3で得られる線形回帰式の事例の幾つかを、図9(a)、図9(b)に示す。

分析で用いたFiLT(t)はFiLTb(t)を採用し、所定値Δt、ta、n5及びtg値は表4に示す値を用いている。

波201に切り出し波GA_{ii,j}(t)を用いた分析結果が図9(a)、

波202、203の重畳波に切り出し波GA_{ii,j}(t)を用いた分析結果が図9(b)、

である。

[0058] ステップS3の処理が完了したならば、フーリエ変換分析を行う場合における実施例1の前処理が終了する。

[0059] 「実施例1の後処理フローチャート(FFT分析)」

次に、実施例1をフーリエ変換分析(FFT分析)する場合の後処理について、図44のフローチャートをも参照して、各ステップ毎に説明する。

ステップS11では、強度を計測したい図5に示すコンクリートシリンダーで、図示するような計測を行い、受信波G(t)を取得する。受信波G(t)は、超音波発信毎に得られる受信波G_k(t)を加算平均して求める。すなわち、

$$G(t) = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} G_k(t) \quad \cdots \text{式S11}$$

ここで、n_cは所定値で、1以上の整数である。

[0060] 次に、ステップS12では、図7(a)又は図7(b)に示す時刻関数FiLT(t) (FiLTa(t)又はFiLTb(t))を複数回(n5)にわたり、前記受信波G(t)へ乗じられ、

- (1) 縦波201、
- (2) モード変換波202、
- (3) モード変換波202と横波(表面波含む)203'との重畳波、或いは、
- (4) 201、202、203'の重畳波、

の何れかを切り出し、GA(t)波を取得する。なお、

$$GA(t) = FiLT(t)^{n5} \cdot G(t)$$

[0061] ここで、前記切り出しで用いるFiLT(t)を定義する係数 Δt 、 t_a 、 $n5$ 、 t_g は、前記ステップS3に関して説明した表4において、分析の対象となった波、すなわち、(1)の縦波201、(2)のモード変換波202、(3)のモード変換波202と横波(表面波含む)203'との重畳波、(4)の201、202、203'の重畳波、の各々について定められた所定値である。係る所定値は、前記ステップS2で説明されている。

[0062] 取得された波GA(t)について、フーリエ変換で、対応するスペクトルFA(f)を求める。すなわち

$$FA(f) = \int_{-\infty}^{\infty} (GA(t) \cdot e^{-i\omega t}) dt \quad \cdots \text{式S12}$$

そして、自動及び手動により、FA(f)スペクトルの極大値(最大値)を示す振動数fkを特定する。

[0063] FA(f)スペクトルの極大値(最大値)を示す振動数fkを特定したならば、 Δt 、 t_a 、 $N5$ 、 t_g で定義される時刻関数FiLT(t) (FiLTa(t)又はFiLTb(t))毎に準備されている図9(a)又は図9(b)に相当する幾つかの線形回帰式より、前記fk値を得た分析法による線形回帰式(例えば、図38)を選ぶ。そして、選択された回帰式の横軸(図38)の振動数fkの位置に対応する縦軸*印の位置の値を読み取る。

この読み取り値(図38における縦軸*印の位置の値)を、計測対象であるコンクリートシリンダーの圧縮強度 σ_u N/mm²とする。

そして、ステップS12の処理が完了する。

[0064] ステップS12が終了すると、FFT分析を行う場合の実施例1が完了する。

[0065] 次に、実施例1で最大エントロピー分析を行う場合について、前処理と後処理とに分けて、説明する。

図45は、実施例1で最大エントロピー分析を行う場合の前処理を、フローチャートによりステップ毎に表現している。

[0066] 「実施例1の前処理フローチャート(最大エントロピー分析)」

図45のステップS21は、実施例1でFFT分析を行う場合の前処理における(図43)ステップS1と同じ処理を行う。

[0067] 図45のステップS22は、実施例1でFFT分析を行う場合の前処理における(図43)ステップS2において、FFT分析を最大エントロピー分析に置き換えている。

すなわち、FFT分析では、スペクトルを求める分析法では、次式

$$FA_{il,j}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} (GA_{il,j}(t) \cdot e^{-i\omega t}) dt \quad \dots \text{式 S 2}$$

となるが、分析法を最大エントロピー分析へ変更すると、次式

$$SA_{il,j}(f) = \frac{P_m \cdot \Delta t}{\left| 1 + \sum_{j=1}^m a_{m,j} \cdot e^{-i\omega \cdot j \times \Delta t} \right|} \quad \dots \text{式 S 2 2}$$

となる。

[0068] 実施例1で最大エントロピー分析を行う場合の前処理を示すフローチャート(図45)におけるステップS22A、S22Bは、各々、実施例1でFFT分析を行う場合の前処理における(図43)ステップS2A、S2Bと同じである。

[0069] 実施例1で最大エントロピー分析を行う場合の前処理を示すフローチャート(図45)におけるステップS23は、基本的には、実施例1でFFT分析を行う場合の前処理における(図43)ステップS3と同様であるが、その説明中から、図9(a)、図9(b)に関する記載を削除する。

また、表4は、実施例1でFFT分析を行う場合の前処理における(図43)ステップS3に関連する説明では、「回帰式係数とfcを得た所定値(FFT分析)」となっているが、実施例1で最大エントロピー分析を行う場合の前処理を示すフローチャート(図45)におけるステップS23に関する説明では、表4のタイトルは「回帰式係数とfcを得た所

定値(最大エントロピー分析)」となるべきである。

[0070] 図45のステップS23が完了すると、最大エントロピー分析を行う場合の前処理が完了する。

[0071] 次に、実施例1で最大エントロピー分析を行う場合の後処理について、図46で示すフローチャートを参照しつつ、ステップ毎に説明する。

[0072] 「実施例1の後処理フローチャート(最大エントロピー分析)」

実施例1で最大エントロピー分析を行う場合の後処理を示すフローチャート(図46)のステップS31は、実施例1でFFT分析を行う場合の後処理(図44)のステップS11と同じである。

[0073] 実施例1でFFT分析を行う場合の後処理(図44)のステップS12では、受信波を切り出して求めたスペクトルが符号「FA(f)」で表示されているが、実施例1で最大エントロピー分析を行う場合の後処理を示すフローチャート(図46)のステップS31では、当該スペクトルは符号「SA(F)」で表示される。

そして、実施例1で最大エントロピー分析を行う場合の後処理を示すフローチャート(図46)のステップS31では、FFT分析の場合(図44のステップS12)の下式が

$$FA(f) = \int_{-\infty}^{\infty} (GA(t) \cdot e^{-i\omega t}) dt \quad \dots \text{式S12}$$

次の式

$$SA(f) = \frac{P_m \cdot \Delta t}{\left| 1 + \sum_{j=1}^m a_{m,j} \cdot e^{-i\omega \cdot j} \Delta t \right|} \quad \dots \text{式S32}$$

に変更される。

[0074] それ以外の点は、後処理フローチャート(FFT分析)におけるステップS12と同様であり、計測対象であるコンクリートシリンダーの圧縮強度 σ_u N/mm² が求まる。

[0075] 図46のステップS32が完了すれば、最大エントロピー分析を行うの実施例1が完了する。

[0076] 「実施例2の前処理の具体的分析事例」

次に、第2実施例(以下、「実施例2」)について、説明する。

[0077] 実施例1は、シリンダーモデルを用いた場合の説明であったが、コンクリート強度測定法を実際のコンクリート構造物に適用する場合、壁、柱、梁における受信波を分析しなければならない。係る場合の受信波は、シリンダーモデルにおける受信波(図6参照)とは大きく異なる。

これに対処する手法について、以下において説明する。

[0078] 実構造物で想定される計測法を図19に示す。実施例2では図19(a)～(e)の5種を示す。

最初に、図19(a)～(e)で示す計測条件について説明する。計測条件の1部が異なる場合は、当該説明箇所でも別途説明する。

計測条件(1):使用する探触子は、径40mm、共振振動数500kHzの振動子を内蔵した1対の発信及び受信探触子。

計測条件(2):30Vのステップ関数型電圧を受信探触子内振動子に印加。

計測条件(3):超音波発信間隔200Hz(5mm秒)。

計測条件(4):条件(3)の超音波発信間隔毎に得る1000個の受信波を加算平均し、得られる加算平均波を本分析で用いる受信波とする。

[0079] 図19では、測定のパターンを(a)～(e)で示しており、各測定パターンで得る受信波に含まれる支配的な波を符号191～197で示している。

コンクリート設計強度を同一とする図20、図21に示す2つのコンクリートモデルでの分析検討結果を、測定パターン(a)～(e)毎に、以下において示す。

なお、計測分析結果の再現性を確認するために、測定パターン毎に探触子配置位置を変えた3ヶ所の受信波に対して、同一の分析処理を行い比較表示する。

[0080] 計測法(計測パターン)(a)～(e)を説明する前に、共通した分析の基本方針について論述する。

実施例1において、 σ_u と f_c の関係を示す図9(a)、(b)は、コンクリート圧縮強度 σ_u と関係する振動数 f_c を、図14の縦波のスペクトルと、図15のモード変換波とシリンダー表面を伝わる横波(含表面波)の混合波のスペクトルとにより特定するものである。

さらに、この振動数の特定に最大エントロピー法を適用すると、図16、図17に示した様に、3つの測点位置の異なる切り出し波のスペクトルが良く一致する現象につい

でも説明した。多くの測定位置の異なる他の受信波の最大エントロピー分析でも例外なく、切り出し波のスペクトルの形状及び極大値位置での振動数が良く一致する(図示せず)。

そのため、実施例2では、主に最大エントロピー法を用いた分析法について説明する。

[0081] 「実施例2 計測法(a)」

図19(a)で示す透過計測の最大エントロピー分析結果を図22、図23に示す。

図22は、図20(a)のAモデル計測での受信波を用いた分析結果である。ここで、受信条件は最後に一括して記述する。

また、図23は、図21(a)のBモデル計測での受信波を用いた計測での分析結果であり、受信条件は最後に一括して記述する。

[0082] 本計測、すなわち実施例2の計測法(a)は透過計測であり、図19に示した(板厚300mmに関する)縦波重複反射波191が、図24の符号242に示すように、繰り返し受信される。

tgで始点時刻が定まるタイムゲインコントロール関数を用いて、この縦波重複反射波を切り出して、そのスペクトルの起生状況を示したものが図22、図23である。

図24によれば、最初大きな振幅の縦波透過波241が生じるが、その後方にモード変換波や、内部鉄筋の存在等に起因した大きな振幅の散乱波等を生じている。

[0083] この問題を除去するために、TGC関数を規定するtg値(図24)を縦波透過波241の起生時刻thから序々に後方時刻へ移動する。tg値(図24)を後方時刻へ移動する経緯の中で得る時刻歴を最大エントロピー分析し、前記移動の都度得られるスペクトルの1部を示したものが図22、図23である。

具体的には、TGC関数として図7(b)に示すFiLTb(t)の係数を、

$$\Delta t = 400 \mu \text{ 秒}, t_a = \infty, n_5 = 100, t_g = 176 \mu \text{ 秒}$$

として、

$$GA_j(t) = FiLTb(t)^{n_5} \cdot G_j(t)$$

を求め、 $GA_j(t)$ を最大エントロピー分析することで、図22、図23のスペクトル比較図を求めている。

[0084] 図示はしないが、tg値をさらに後方へ移動して設定しても、図22、図23のスペクトル極大値位置の振動数は変化しない。

図22、図23において、符号221のカーソル位置及び符号231のカーソル位置における振動数(スペクトル極大値位置の振動数)は、共に44.4kHzと読み取れる。双方のコンクリートモデル(図20(a)のAモデル、図21(a)のBモデル)とも、設計コンクリート強度は同一($20\text{N}/\text{mm}^2$)なので、図22、図23で得られた振動数(スペクトル極大値位置の振動数)が同一の値である44.4kHzなのは、当然といえる。

[0085] 「実施例2 計測法(b)」

計測法(b)は、探触子間隔を材厚に比し、0.25倍以下とする反射法計測である。モデルA、モデルB(図20(a)のAモデル、図21(a)のBモデル)で、探触子間隔 $A=80\text{mm}$ として得た受信波による分析結果の1部を図25、図26に示す。

上述した計測法(a)、透過計測の場合における縦波重複反射波模式図(図24)にならい、計測法(b)における反射波計測の模式図を図27に示す。

[0086] 時刻tgでその形状が定まるTGC関数を用いて、図27の符号272で示す縦波重複反射波を切り出し、そのスペクトルの起生状況を、図20(b)の符号1、2、3で示す測定で比較表示したのが図25、図26である。

[0087] 図27では、最初大きな振幅の、材厚に関する縦波重複反射波(符号271)が生じる。そして、その後方にモード変換波と横波反射波も生じる。加えて、内部鉄筋からの反射波等も、この時間帯に混在する。

この様に数種類の波の混在は、得られるスペクトルの振動数に大きな影響を与えてしまう。係る問題を除去するために、前記計測法(a)の場合と同様に、TGC関数のtg値を前記th値から序々に時間軸後方へ移動して行く経緯の中で得る時刻歴を最大エントロピー分析し、移動の都度得られるスペクトルの1部を示したものが図25、図26である。

[0088] 具体的には、TGC関数として図7(b)に示す $\text{FiLTb}(t)$ の係数を $\Delta t=400\mu\text{秒}$ 、 $t_a=\infty$ 、 $N_5=1000$ 、 $t_g=160\mu\text{秒}$ として、

$$GA_j(t) = \text{FiLTb}(t)^{n_5} \cdot G_j(t)$$

を求め、 $GA_j(t)$ を(A-3)式に示す最大エントロピー分析することで、図25、図26

のスペクトル比較図を求めている。

- [0089] 図示はしないが、計測法(a)の場合と同様に、前記tgを更に後方へ移動していても、図25、図26のスペクトル極大値位置(符号251、261で示すカーソル位置)の振動数は殆んど変化しない。

モデルA、モデルB(図20(a)のAモデル、図21(a)のBモデル)は、同一設計強度で作成したものであるため、図25、図26のスペクトル極大値位置、すなわち、図25と図26の符号251、261で示すカーソル位置の振動数は同一になる。そして、図25と図26において、符号251、261で示すカーソル位置の振動数は共に45.1kHzとなっている。

- [0090] ここで、計測法(a)では対応する振動数(スペクトル極大値位置の振動数)が44.4kHzであるのに対して、計測法(b)では45.1kHzとなっている。この、45.1kHzと44.4kHzと云う若干の違いは、計測法の違い(透過法と反射法)により、分析対象波 $GA_j(t)$ に混入するコンクリート内散乱波の度合いが異なることから生じたものと判断する。

- [0091] 「計測法(a)と計測法(b)で共通する現象」

図22の透過法によるスペクトルと、図25の反射法によるスペクトルとでは、注目すべき同一の現象を確認できる。双方共、図20のコンクリートモデルAを用いての分析結果である。

図22では、若干の差ではあるが、測点3(図20(b)の符号3で示す測定箇所)のスペクトルの極大値(最大値)位置の振動数が、測点1、2(図20(b)の符号1、2で示す測定箇所)の振動数(スペクトルの極大値位置の振動数:44.4kHz)よりも高振動数側にずれている。また、図25でも同様に、測点3のスペクトルの極大値位置の振動数が、測点1、2の振動数(44.4kHz)から大きく高振動数側へずれている。

すなわち、計測法(a)、(b)双方の分析結果において、測点3のスペクトルの極大値位置振動数が高振動数側へ変化している。

- [0092] 計測法(a)、(b)双方で、測点3のスペクトルの極大値位置振動数が高振動数側へずれているのは、コンクリート内に埋め込まれた鉄筋の存在で生じたものである。

図20のコンクリートモデルAでの計測法(a)、(b)計測での探触子配置位置を確認

すれば理解されるように、測点3では、発信探触子及び受信探触子が、コンクリート内部に埋め込まれた鉄筋直上付近のコンクリート面に配置されている。そのため、測点3での受信波 $G_3(t)$ 及び切り出し波 $GA_3(t)$ には、鉄筋からの反射波及び散乱波が多量に混入する。従って、図22、図25のスペクトル比較で、スペクトルの極大値(最大値)位置の振動数が、測点1、2と測点3とで相違する。

[0093] 「実施例2 計測法(c)、計測法(d)」

計測法(c) (図19参照)は、探触子間隔 a を、材厚に比し0.65倍以上とした場合の計測法である。

計測法(d)は探触子間隔 a を100mm〜200mm程度とした場合の表面波の計測法である。

これ等の計測法による受信波の模式図を図28に示す。

[0094] モデルA、モデルB(図20(a)のAモデル、図21(a)のBモデル)において、探触子間隔 $a=200\text{mm}$ として得た受信波を用いた最大エントロピー分析に関して、説明する。

先ず、モデルAとモデルBのコンクリート表面の劣化度を検討する。図19で示す計測法(d)による分析と云うことになる。図19の(d)において、符号194で示すコンクリート表面を伝達する波と、コンクリート表層を浅く潜って伝達する波(符号195)の周波数分析である。

[0095] 図28の表面波285(図19(d)の194、195の混合した波)を切り出し、最大エントロピー分析で得たスペクトル比較図を、図29(モデルA)、図30(モデルB)に示す。

図29、図30は、共に、測点1、2のスペクトルの極大値(最大値)位置の振動数が一致している。図29のモデルAの場合で、測点1、2のスペクトルの極大値(最大値)位置振動数が31.3kHz、図30のモデルBの場合で、その振動数が37.7kHzである。

この振動数(31.3kHz、37.7kHz)の違いは、モデルA及びモデルBの表層部コンクリート強度が異なっていることを示している。

[0096] なお、図29、図30で、測点3の前記振動数が測点1、2の振動数と若干異なっているが、これは、図20(d)、図21(d)の計測で、測点3の位置がコンクリートモデルの端

部に近いことより生じた現象と考えられる。

即ち、測点3の計測では、図31の表面波312と、モデル端部反射経路の表面波311とが、重畳して受信されていることに起因すると考えられる。図31は、上述したモデルA、Bのコンクリートモデルの全体が符号Mで示されており、当該コンクリートモデルMの測点3近傍の端部(モデル端部)が符号Meで示されている。そして、測点3に設けられた発信探触子4eからのモデル端部反射経路の表面波311は、モデル端部Meで反射した後、受信探触子5eで受信されているので、表面波312に比較して、その伝達距離が長くなっている。そのため、測点3のスペクトル極大値位置振動数が、測点1、2のスペクトル極大値位置振動数と相違している

- [0097] 図29、図30のスペクトルを得るための具体的処理は、TGC関数として、図7(b)に示すFiLTb(t)の係数を $\Delta t=400 \mu$ 秒、 $t_a=120 \mu$ 秒、 $n_5=500$ 、 $t_g=32 \mu$ 秒として、

$$GA_j(t) = FiLTb(t)^{n_5} \cdot G_j(t)$$

を求め、 $GA_j(t)$ を(A-3)式に示す最大エントロピー分析している。

- [0098] 次に、モデルAとモデルBの材厚に関する重複反射の振動数を検討する。図19の計測法(c)による分析と云うことになる。図19(c)の波192と波193の重畳反射混合波の周波数分析である。

図28の受信波模式図に示す各波の内、時間軸後方に生ずる波を切り出す。

ここで、モデルA、モデルBの縦波音速は、別途4400m/秒と計測されている。この数値を用いると、縦波1回反射波の起生時刻 t_h は、 $a=200$ mm、材厚300mmとして、次の式で計算することが出来る。

$$t_h = \frac{2 \times \sqrt{\left(\frac{200}{2}\right)^2 + 300^2}}{4.4} = 143.6 \mu \text{ 秒} \quad \cdots \text{式B 1}$$

- [0099] 前述と同様に、TGC関数を図7(b)に示すFiLTb(t)とし、その係数を

$$\Delta t=400 \mu \text{ 秒、} t_a=\infty、N_5=1000$$

とし、 t_g の初期値を前記 $t_h(=143.6 \mu \text{ 秒})$ とし、 Δt_g を所定の値とし、 $t_g=t_g+\Delta t_g$

の計算の都度、

$$GA_j(t) = FiLTb(t)^{n5} \cdot G_j(t)$$

を求める。そして、 $GA_j(t)$ を(A-3)式の最大エントロピー分析に適用し、スペクトル $S_j(f)$ を計算し、該スペクトルを比較表示する経緯の中で得たスペクトル比較図($tg=27\mu$ 秒)が、図32、図33である。

[0100] 図32のモデルAのスペクトル $SA_j(f)$ によれば、スペクトルの極大値位置の振動数が測点1、2、3で48.4kHzとなっている。図33のモデルBでも、スペクトル極大値位置振動数が、測点1、2、3で48.4kHzと読み取れる。 tg をさらに時間軸後方へ移動しても、スペクトル極大値位置振動数(48.4kHz)は殆んど変化しない。

[0101] ところで、 tg を時刻軸後方へ移動させながらスペクトル $SA_j(f)$ の変化を視認する機能は、スペクトル極大値位置の振動数を特定するのに重要である。これに、関して説明する。

図34は、TGC処理を行わずに $G_j(t)$ 波を直接、最大エントロピー分析した結果の内、図33のモデルBに対応するスペクトル比較図である。図34では、スペクトルの極大値位置の振動数が、測点1、2、3の全てで異なっているのが確認できる。

モデルBにおいて、図28の表面波285のスペクトル極大値位置振動数は37.7kHz(図30)であった。この表面波285などを除去して得たスペクトル極大値振動数は48.4kHzであった。これ等のことより、図34の $G_j(t)$ 波による分析で、各測点1〜3でのスペクトル極大値位置振動数が異なった理由は、振動数の異なる表面波が混在したためであることが理解される。

[0102] 「実施例2 計測法(e)」

斜透過計測による分析例も示す。図19(e)に対応している。

図35は、コンクリートモデルB(図21(a)のBモデル)を用いた分析結果であり、前記計測法(d)による分析結果(図33)を得たと同一の処理で求めたものである。

探触子間隔 $a=200\text{mm}$ 、版厚 $d=300\text{mm}$ とした計測であり、最初に受信子に達する縦波(196)の受信時刻 th は、当刻コンクリート音速を $V_p=4500\text{m/秒}$ として、下式で計算できる。

$$t_h = \sqrt{200^2 + 300^2} / 4.5 = 360.55 / 4.5 = 80.1 \mu \text{秒} \quad \dots \text{式B 2}$$

[0103] 図7に示すFiLTb(t)の係数を

$$\Delta t = 400 \mu \text{秒}, t_a = \infty, n_5 = 20$$

として、tgの初期値をth(=80.1 μ 秒)とし、 $\Delta t_g = 5 \mu$ 秒として、

$$t_g = t_g + \Delta t_g$$

を繰り返し計算する都度、

$$GA_j(t) = FiLTb(t)^{n_5} \cdot G_j(t)$$

を求める。そして、 $GA_j(t)$ に(A-3)式の最大エントロピー分析を適用し得られるスペクトル $SA_j(f)$ を比較表示した結果の1部($t_g = 144 \mu$ 秒)が図35である。

[0104] 「実施例3 前処理の具体的分析事例」

次に、実施例3における前処理の具体的分析事例について、説明する。

なお、実施例2を制御フローチャートに沿った説明は、実施例3と共に、後述する。

[0105] 図19(b)で示す計測は、2探触子計測であったが、係る計測を1探触子で行った場合についても説明する。

図36は、測点1〜3の受信波を比較表示したものである。図36の符号361に示す波の起生は、振動子に30Vのステップ関数型電圧を印加した時、振動子内に生ずる振動の時刻歴である。

図36におけるカーソル362に $d = 300\text{mm}$ の版厚反射波の起生を確認できる。

[0106] 図7(b)に示すFiLTb(t)の係数を、 $\Delta t = 400 \mu$ 秒、 $t_a = \infty$ 、 $N_5 = 50$ 、 t_g をカーソル362で示す時刻(140 μ 秒)より後方の170 μ 秒として、

$$GA_j(t) = FiLTb(t)^{n_5} \cdot G_j(t)$$

を求め、 $GA_j(t)$ を(A-3)式を用いて最大エントロピー分析することで得るスペクトル $SA_j(f)$ を図37で比較表示する。前記した波361の残存が時刻後方にあることより、測点1、2、3のスペクトルの極大値位置振動数に若干の違いがあるが、平均値として44.7kHzが読み取れる。

この計測法と対応する2探触子法(「実施例2 計測法(b)」参照)での前記振動数

が、図26で45.1kHzとなっていることより、その差(44.7kHzと45.1kHzとの差異)は許容の範囲と考えられる。

以上より、1探触子計測及び2探触子計測のいずれでも、材厚に関する重複反射の卓越する振動数を取り出すことができることが理解される。

[0107] ここで、図19を参照して、実施例2の前処理における計測法を整理して、再度説明する。係る計測法は、次の5種類となる。

(A) 透過法

(B) 反射法

探触子間隔を a 、被計測体材厚を D として

$$a \leq 0.25 \times D$$

(C) 反射波法

探触子間隔を a 、被計測体材厚 D として

$$a \geq 0.65 \times D$$

(D) 計測は、表面配置法

(E) 計測は、斜透過法

[0108] 実施例3前処理で用いた計測法は、超音波の発信と受信を1つの探触子で共用する反射法で、図19(b)の計測法に対応する。

実施例2前処理の5種の計測波及び実施例3前処理の計測法を、設計強度を同一とする2つのコンクリートモデルへ適用する。そして、得られた受信波 $G_j(t)$ (j は、測点の数)より、 Δt 、 t_a 、 n_5 、 t_g を所定の係数とするTGC関数 $F_i L T_b(t)$ を用いて、分析用の波 $GA_j(t)$ を切り出す。

ここで、TGC関数 $F_i L T_b(t)$ を定義する各係数については、計測法毎に前述してある。本明細書では、以降、当該係数を「所定値」と記載する。

[0109] この分析用の波或いは切り出し波 $GA_j(t)$ に、(A-3)式による最大エントロピー分析を適用することで、スペクトル $SA_j(f)$ を求める。

2つのコンクリートモデル(A、B:図20(a)、図21(a)参照)の双方で、測点 j 毎に得られる $SA_j(f)$ の関数形状と、この関数の最大値位置を示す振動数 f_c とが良く一致することを、実施例2前処理の計測法(a)、(b)、(c)、(d)、(e)及び実施例3前処理の

計測法で確認した。

また、設計強度を同一とする2つのコンクリートモデル(A、B)で得られるスペクトルの極大値位置 f_c の値が、計測法(d)を除く他の全ての計測法(a)、(b)、(c)、(e)毎に、殆んど一致することを確認した。

実施例3前処理では、Bモデル(図21(a)参照)での分析結果のみ示し、Aモデル(図20(a)参照)での分析結果は省略した。

- [0110] 実施例2前処理の計測法(d)の場合のみ、設計強度を同一とする2つのコンクリートモデル(A、B)の前記 f_c 値が同一値とならなかった理由について、説明する。

図19(d)で示す計測法は、コンクリート表層を伝達する波194と波195との混合波の振動数を求めたものと考えることができる。

ここで、表層のコンクリート強度は、コンクリート打設後の施工状況で大きく異なってくる。また、壁材の様な場合、打設時のコンクリート重量により、壁下部のコンクリートが圧密されるが、壁上部は壁下部に比較して、この圧密の程度が緩和される。そのため、壁上部に比較して、壁下部の強度が大きくなる。さらに、スラブ材(床材)等も、前記と同様の理由で、上層表面に比較して下層表面の強度が大きくなる場合がある。

これに加えて、コンクリート打設時に、打設作業を容易にすべく水を規定以上に打設コンクリートに混入する場合が存在することは否定できない。その様な場合、コンクリート表層の強度は小さくなる。

以上述べた様な種々の打設条件の複合作用により、図19(d)で示す計測では、前記 f_c 値が同一とならなかった訳である。

- [0111] 簡略化のため分析例としては示してはいないが、実施例2の前処理で示す様に設計強度をパラメータとした図20又は図21の様なコンクリートモデルを準備して、実施例2前処理の計測法(a)、(b)、(c)、(d)、(e)及び計測法3で示した分析を行えば、実施例2の各計測法(a)～(e)及び実施例3の計測法毎に、図9(a)又は図9(b)に相当する線形回帰式

$$\sigma_u(f_c) = \alpha \cdot f_c - \beta \quad (1) \text{ (再掲)}$$

を特定することができる。

- [0112] 上述した(1)式の線形回帰式において重要なもう1つのパラメータである「被計測体

の厚さD」について説明する。

実施例2の計測法(a)、(b)、(c)、(e) (計測法(d)を除く)及び実施例3では、受信波 $G_j(t)$ の時間軸後方に含まれる被計測体の厚さDに関する重複反射を分析の対象としている。そして、この重複反射波のスペクトルの内、スペクトル値が最も大きくなるスペクトルの最大値位置(或いは極大値位置)の周波数を、「fc」として特定している。

前記重複反射波には被計測体の厚さに関する共振成分が多量に含まれる。共振の1次振動数 fc_L は、前記被計測体の厚さD(mm)とコンクリートの音速 V_p (mm/ μ 秒)を用いて、

$$fc_L = 10^3 / (2D / V_p) \text{ (kHz)} \quad \cdots \cdots (Y-1)$$

となる。

前記fc値と、 fc_L 値(上式で用いた共振の1次振動数)との関係を、図39に示す。

- [0113] 前記共振成分は次数を持ち、そのスペクトルの極大値は fc_L 値の整数倍位置と合致する。前記fc値を図39で示せば、

$$fc = 3fc_L$$

となる。これより、上述したfc値は、最も卓越して生ずる次数の共振スペクトルの振動数と云うことになる。

- [0114] 実施例2前処理の計測法(a)、(b)、(c)、(e)及び実施例3前処理の計測法を用いる場合、前記 fc_L 値及びfc値が被計測体の厚さDによっても変化する。

以上より、実施例2の計測法(a)、(b)、(c)、(e)及び実施例3の計測法を用いる場合、(1)式で示す線形回帰式の係数 α 、 β は、被計測体の厚さD毎に異なったものとなる。

ここで、計測法(d)は、コンクリート表層を伝達する波を切り出す分析を行う計測法であり、(Y-1)式が示す被計測体厚さDの共振現象とは無関係な分析である。従って、計測法(d)の場合、被計測体の厚さDが変化しても、前記 α 、 β の値は変化しない。

- [0115] 以上より、設計強度が例えば、 10N/mm^2 、 18N/mm^2 、 24N/mm^2 、 27N/mm^2 、 33N/mm^2 、 36N/mm^2 、 45N/mm^2 、 60N/mm^2 のコンクリートモデルを、厚さDのパラメータ(例100mm、125mm、150mm・・・500mm)として各々作成し、

個々のコンクリートモデルで前記 f_c 値を求めることになる。

具体的には、個々のモデルで、図19の(a)～(e)に示す計測を、前述実施例2で説明した様に行い、得られた受信波 $G_j(t)$ (j は測点番号)に対して、所定の係数値 Δt , t_a , n_5 , t_g で定義されるTGC関数 $FiLT(t)$ を用いて、下式により $GA_j(t)$ 波を作成する。

$$GA_j(t) = FiLT(t)^{n_5} \cdot G_j(t)$$

ここで、 $FiLT(t)$ は $FiLTa(t)$ 又は $FiLTb(t)$ となる。

- [0116] そして、求められた $GA_j(t)$ を最大エントロピー分析することで得られるスペクトル $SA_j(f)$ の形状において、 j が変化してもその形状が概略同一となることを確認した後、 $SA_j(f)$ の極大値(最大値)を示す振動数 f_c を、
- 計測法(a)であれば、図22又は図23の様に、
- 計測法(b)であれば、図25又は図26の様に、
- 計測法(c)であれば、図32又は図33の様に、
- 計測法(d)であれば、図29又は図30の様に、
- 計測法(e)であれば、図35の様に、
- 特定する。

- [0117] 以上の様に、設計強度 σ_U 及びコンクリート供試体厚さ D の双方をパラメータとした分析で前記 f_c 値を求めた後、各コンクリートモデルより実施例1で示した圧縮試験用シリンダーをコア抜きし、アムスラー試験機などで破壊試験を行い、圧縮破壊強度 σ_U を求めれば、前記(2)、(3)式(実施例1の前処理フローチャート(FFT分析)のステップS3の説明参照)を用いて、線形回帰式(1) (図9(a)及び図9(b)に相当する線形回帰式)

$$\sigma_U(f_c) = \alpha \cdot f_c - \beta \quad (1) \text{ (再掲)}$$

における α 、 β 値が、計測コンクリートの厚さ D 毎に得られる。

- [0118] より正確には、 α が $\alpha(D)$ 、 β が $\beta(D)$ の様に厚さ D の関数となり、(1)式は次の(1')

$$\sigma_U(f_c) = \alpha(D) \cdot f_c - \beta(D) \quad (1')$$

(但し、計測法(d)では前記 D の値が異なっても(1)式の α 、 β 値は変化しない。)

(1')式の計測コンクリート厚さD毎に整理された線形回帰式を、本実施形態に係る超音波装置のHD25に保存し、超音波装置起動時に、CPU19のコントロール下でメモリ26に転送する。

[0119] 「実施例2及び実施例3 後処理の具体的分析事例」

次に、実施例2及び実施例3における後処理の具体的分析事例について、説明する。

[0120] コンクリート構造物のコンクリート強度を計測したい場合、先ず、当該位置において、「実施例2の前処理の具体的分析事例」において説明した計測条件(1)～(4)の下で、図19で示す計測法(a)～(e)或いは実施例3の計測の何れかを行い、受信波 $G_j(t)$ を収録する。ここで、jは、測点である。

この計測時、計測位置での部材厚Dは既知とする。また、測点j($j=1, n_s:n_s$ は1以上の整数)で部材厚は変化しないものとする。

[0121] 実施例2の各計測法(a)～(e)及び実施例3で示したTGC関数の係数 Δt 、 t_a 、 n_5 、 t_g を所定値とする時刻関数 $FiLTb(t)$ を用いて、

$$GA_j(t) = FiLTb(t)^{n_5} \cdot G_j(t)$$

を求める。

切り出し波 $GA_j(t)$ に、(A-3)式で示す最大エントロピー分析を施せば、スペクトル $S_j(f)$ (jは測点番号: $j=1 \sim n_s$)が得られる。スペクトル $SA_j(f)$ の形状は、jが変化しても概略同一となることを確認した後、 $SA_j(f)$ の極大値(最大値)を示す振動数 f_k を、

実施例2の計測法(a)であれば、図22又は図23の様に、

実施例2の計測法(b)であれば、図25又は図26の様に、

実施例2の計測法(c)であれば、図32又は図33の様に、

実施例2の計測法(d)であれば、図29又は図30の様に、

実施例2の計測法(e)であれば、図35の様に、

実施例3の計測であれば、図37の様に、

特定する。なお、但し、スペクトル $SA_j(f)$ の極大値位置振動数 f_k について、図22、図23、図25、図26、図32、図33、図29、図30、図35、図37では、同じ物理量(スペクトル $SA_j(f)$ の極大値位置振動数)を f_c と表記している。

[0122] スペクトル $SA_j(f)$ の極大値位置振動数 fk を、線形回帰式(1')に当て嵌める。この線形回帰式(1')は、実施例2の計測法(a)～(e)又は実施例3の計測法毎に、被計測体コンクリートの材厚 D 毎に組み合わせて準備されたものであり、振動数 fk の関数である圧縮強度 $\sigma_U(fk)$ と、被計測体コンクリート材厚 D により変化する振動数 $fk(D)$ との線形関係を示すものである。なお、上述した線形回帰式(1')では、スペクトル $SA_j(f)$ の極大値位置振動数を「 f_c 」と表記しているが、これを「 fk 」に置換すれば良い。そして、図38の σ_U を、極大値位置振動数 fk に対応する縦軸の*印位置の座標を読み取ることで、当該計測位置でのコンクリート強度を予測できるのである。

[0123] 「実施例2、実施例3の前処理フローチャート(最大エントロピー分析)」

次に、図47をも参照して、最大エントロピー分析を行う場合における実施例2、実施例3の前処理を説明する。

[0124] 図47で示す最大エントロピー分析を行う場合における実施例2、実施例3の前処理のフローチャートでは、分析波 $GA_{ii,ij,j}(t)$ よりスペクトルを取り出す方法として最大エントロピー分析による場合(最大エントロピー分析を行う場合における実施例2、実施例3の前処理)を示す。ここで、添字「ii」、「i1」、「j」の意味するところは、図43のフローチャートにおけるステップS41に関する記述を参照して戴きたい。

なお、実施例1で前述したように、最大エントロピー分析の代わりにFFT分析を用いることもできます。その場合(最大エントロピー分析の代わりにFFT分析を用いる場合には、以降の記述で、 $SA_{ii,ij,j}(f)$ を $FA_{ii,ij,j}(f)$ に置換する。

[0125] ステップS40

設計基準強度の異なるコンクリートモデルを、厚さ(D)をパラメータとして作成する(図40参照)。

コンクリートモデルの作成に際して、

設計基準強度は、 $10\text{N/mm}^2 \sim 60\text{N/mm}^2$ を離散化して、 n_E 種類だけ作成し、材厚 D は、 $10\text{cm} \sim 100\text{cm}$ を離散化して、 n_F 種類だけ作成、するので、「 $n_E \times n_F$ 」種類のコンクリートモデルを作成することになる。

このステップS40が完了したならば、ステップS41に進む。

[0126] 次のステップS41では、先ず、図19(a)～(e)の計測法で、発信探触子201より広

帯域超音波を入力し受信探触子202で広帯域超音波を受信する。ここで、図19の(a)、(e)は透過計測、(b)、(c)は反射計測、(d)は表面配置計測である。また、発信探触子201と受信探触子202とを共用する探触子計測は、図19(b)の計測に対応する(図示せず)ので、(b')計測と定義する。

受信波 $G_{ii, ij, j}(t)$ は、超音波発信ごとに得る受信波 $G_{ii, ij, j, k}(t)$ を加算平均したものであり、次式で表現される。

$$G_{ii, ij, j}(t) = \frac{1}{nc} \sum_{k=1}^{nc} G_{ii, ij, j, k}(t) \quad \dots \text{式C1}$$

上式において、

$ii=1 \sim n_F$: n_F は材厚の種類数(ステップS40参照)。

$il=1 \sim n_E$: n_E はコンクリート設計基準強度の種類数(ステップS40参照)。

$j=1 \sim n_B$: n_B は同一設計基準強度コンクリートモデルで得る受信波の数。同一コンクリートモデルで探触子位置を変えて計測する。

$k=1 \sim n_c$: n_c は前記加算平均の加算回数。

[0127] 図47のステップS41が完了したならば、ステップS41-1において、ステップS41で採用された計測法をチェックする。

ステップS41-1において、ステップS41で用いられた計測法が、2探触子を用いた計測法(a)、(b)、(c)、(e)、或いは1探触子による計測法(b')を用いているのであれば、ステップS42-1へ進む。一方、ステップS41で、2探触子を用いた計測法(d)を用いている場合には、ステップS42-2に進む。

[0128] 先ず、ステップS41-1、すなわち、ステップS41で用いられた計測法が、2探触子を用いた計測法(a)、(b)、(c)、(e)、或いは1探触子による計測法(b')である場合を説明する。

図19の計測法(a)、(b)、(c)、(e)、或いは1探触子による計測法(b')で得られる受信波 $G_{ii, ij, j}(t)$ には、時刻軸後方に、材厚に関する重複反射、すなわち図19で示す波191、195、192が繰り返し含まれる。

ステップS41-1では、この重複反射の卓越する振動数成分の(スペクトルにおける極大値を取る位置の)振動数 f_c を特定する。

[0129] そして、外部からその値を指定される材厚 D 及びコンクリート音速 V_p を用いて、受信時刻 t_h を計算する。

計測法(a)であれば、図19(a)で示す重複反射波191の1回目の波の受信時刻 t_h を $t_h = D/V_p$ で計算する。

計測法(b)、(c)であれば、図19(b)の重複反射波195或いは図19(c)の重複反射波192の、1回目の波の受信時刻概略値 t_h を $t_h = 2 \times D/V_p$ で計算する。

計測法(e)計測であれば、図19(e)の材厚重複反射波196における1回目の波の受信時刻 t_h を $t_h = (D^2 + a^2)^{1/2}/V_p$ で計算する。

[0130] この波の受信時刻 t_h は、受信波の切り出しを行うための時刻関数FiLT(t)の形状を定義するのに用いられる。

すなわち、図7(a)、図7(b)等の時刻関数FiLT(t)を複数回(n_5)に渡り、前記 $G_{ii,i,j,j}(t)$ 波に乗じて、

$$GA_{ii,ij,j}(t) = \text{FiLT}(t)^{n_5} \cdot G_{ii,ij,j}(t)$$

なる式により、切り出し波 $GA_{ii,ij,j}(t)$ を取得する。

その際に、必要となる時刻関数FiLT(t)について、その形状を定義する野に必要な数値である Δt 、 t_a 及び n_5 は、各計測法毎に予め設定された所定値であるが、FiLT(t)の形状を定義するのに必要なもう1種類の数値「 t_g 」として、前記 t_H 値を用いるのである。

[0131] 前記切り出し波 $GA_{ii,ij,j}(t)$ を最大エントロピー分析して $SA_{ii,ij,j,B}(f)$ を求め、 $j=1 \sim n$ で比較表示(図8)する。そして、図8でスペクトルの極大値(最大値)位置を示す振動数を fc 値として特定する。

fc 値を特定する際に、前記所定値 Δt 、 t_a 、 n_5 の値を若干変更しながら前記 t_g 値を時間軸方で後方へ移動していくと $j=1 \sim n$ の $SA_{ii,ij,j,B}(f)$ スペクトルの形状が概略一致して来る。そして、 t_g 値をさらに後方へ移動していても、 fc 値が変動しなくなる。この様な $SA_{ii,ij,j}(f)$ スペクトルの変化のパターンを確認しながら、 Δt 、 t_a 、 n_5 、 t_g 値の変更を自動又は手動で行う。

但し、コンクリート厚及び計測法が同一のコンクリートモデルでの分析では、 Δt 、 t_a 、 n_5 、 t_g 値は一定の値となる様にする。

[0132] 次に、ステップS41-2、すなわち、ステップS41で用いられた計測法が、2探触子を用いた計測法(d)である場合を説明する。

図19(d)の2探触子計測で得られる受信波 $G_{ii,ij,j}(t)$ では、コンクリート表層を伝達する表面波194、波195等が、図28の符号285で示すように、時刻軸前方に生じる。

この表面波の内、最も早く受信する波は表層に自然発生する縦波である。この縦波の起生時刻 t_h は、コンクリート縦波音速を V_p 、探触子内振動子径を Φ 、伝達距離補正係数を $\alpha_1 (=0.8)$ 、発信探触子と受信探触子との中心間距離を a 、として

$$t_h = (a - \alpha_1 \cdot \Phi) / V_p \text{ となる。}$$

[0133] 図7(a)、図7(b)等の時刻関数FiLT(t)を複数回(n5)に渡り、受信波 $G_{ii,ij,j}(t)$ に乘じ、切り出し波 $GA_{ii,ij,j}(t)$ を求める。

$$GA_{ii,ij,j}(t) = \text{FiLT}(t)^{n5} \cdot G_{ii,ij,j}(t)$$

ここで、時刻関数FiLT(t)の形状を定義する数値の内、 Δt 、 t_a 及び前記n5は、予め設定された所定値である。そして、時刻関数FiLT(t)の形状を定義するのに必要なもう一つの数値 t_g を、上述した縦波の起生時刻 t_h とする。そのようにして形状を定義されたFiLT(t)を用いて、切り出し波 $GA_{ii,ij,j}(t)$ を求める。

[0134] 前記切り出し波 $GA_{ii,ij,j}(t)$ を最大エントロピー分析し、 $SA_{ii,ij,j}(f)$ を求め、 $j=1 \sim n_B$ で比較表示(図8)する。

そして図8で、スペクトルの極大値(最大値)位置を示す振動数を f_c 値として特定する。

スペクトルの極大値(最大値)位置を示す振動数を f_c 値を特定する際に、前記所定値 Δt 、 t_a 、n5及び t_g の値を若干量変更すると、 $j=1 \sim n_B$ のスペクトル $SA_{ii,ij,j}(f)$ の形状が概略一致して来る。但し、コンクリート厚及び計測法が同一のコンクリートモデルでの分析で Δt 、 t_a 、n5、 t_g 値は一定の値となる様にする。

[0135] ステップS42-1或いはステップS42-2の何れかが終了したならば、ステップS42Aに進む。

ステップS42Aでは、他の設計基準強度のコンクリートモデルについても、ステップS41-1、S42-1又はS42-2の処理が完了したか否かを判断する。換言すれば、「i

$l = n_E$ 」であるか否かを判断するのである。

- [0136] 全ての設計基準強度について(コンクリートモデルの)処理を完了していなければ(或いは $i1 < n_E$ よりも小さければ)(ステップS42AがNO)、 $i1$ のカウントアップを行い($i1 = i1 + 1$:ステップS42B)、ステップS41-1に戻る。

一方、全ての設計基準強度について(コンクリートモデルの)処理を完了していれば(或いは $i1 = n_E$ であれば)(ステップS42AがYES)、ステップS42Cに進む。

- [0137] ステップS42Cでは、他のコンクリート厚Dについて、ステップS41、ステップS41-1、S42-1又はS42-2の処理が完了したか否かを判断する。換言すれば、「 $ii = n_F$ 」であるか否かを判断するのである。

- [0138] 全てのコンクリート厚Dについて(コンクリートモデルの)処理を完了していなければ(或いは $ii < n_F$ よりも小さければ)(ステップS42CがNO)、 ii のカウントアップを行い($ii = ii + 1$:ステップS42D)、ステップS41に戻る。

一方、全てのコンクリート厚Dについて(コンクリートモデルの)処理を完了していれば(或いは $ii = n_F$ であれば)(ステップS42CがYES)、ステップS43に進む。

- [0139] ステップS43では、コンクリートモデルの材厚D毎に、受信波 $G_{ii, jj, j}(t)$ のナンバリングを付与し直し $G_{ii, jj}(t)$ として説明する。ここで jj は $1 \sim n_D$ ($n_D = n_E \times n_B$)の整数である。

ステップS43において、上述したステップS41、S41-1、S42-1或いはS42-2で繰り返し処理することにより得られた fc 値を、受信波 $G_{ii, jj}(t)$ 毎に $X_{jj}(t)$ kHzと表現し直す。

また、受信波 $G_{ii, jj}(t)$ を得た位置で、図41のようにコア抜きしたコンクリートシリンダーのアムスラー試験機などを用いた圧縮破壊試験で得られる破壊強度を $Y_{jj} \text{ N/mm}^2$ と表現する。

- [0140] 圧縮破壊強度 σ_U と前記 fc 値との関係を

$$\sigma_U(fc) = \alpha \cdot fc - \beta$$

なる線形回帰式とし、次式(2)、(3)(再掲)で α 、 β 値を決定する。

$$\alpha = \frac{\sum_{jj=1}^{n_D} (X_{jj} - \bar{X})(Y_{jj} - \bar{Y})}{\sum_{jj=1}^{n_D} (X_{jj} - \bar{X})^2} \quad \dots \text{式D 1}$$

$$\beta = \bar{Y} - \alpha \cdot \bar{X} \quad \dots \text{式D 2}$$

なお、当該線形回帰式に関する相関係数 r は、次式(4)で決定される。

$$r = \frac{1}{n_D - 1} \sum_{jj=1}^{n_D} (X_{jj} - \bar{X})(Y_{jj} - \bar{Y}) / \left\{ \sqrt{\frac{1}{n_D - 1} \sum_{jj=1}^{n_D} (X_{jj} - \bar{X})^2} \times \sqrt{\frac{1}{n_D - 1} \sum_{jj=1}^{n_D} (Y_{jj} - \bar{Y})^2} \right\} \quad \dots \text{式D 3}$$

[0141] 決定した線形回帰式を、表5で示す様に、「ii」毎に(或いは、コンクリートモデル厚D毎に)作成し、解析装置内のハードディスク25(図1)に保存記憶させる。

[表5]

表5 コンクリートモデル厚D毎に作成される線形回帰式係数表

計測法			所定値				回帰式係数		
			Δt	t_a	$n5$	t_g	α	β	r
2	$i2 = 1$	FiLTb(t)	・	・	・	・	・	・	・
	計測法 (a)								
	$i2 = 2$	"	・	・	・	・	・	・	・
	計測法 (b)								
	$i2 = 3$	"	・	・	・	・	・	・	・
	計測法 (c)								
探 触 子	$i2 = 4$	"	・	・	・	・	・	・	・
	計測法 (d)								
	$i2 = 5$	"	・	・	・	・	・	・	・
	計測法 (e)								
	$i2 = 6$	FiLTb(t)	・	・	・	・	・	・	・
	計測法 (b)								
1	$i2 = 7$	FiLTa(t)	・	・	・	・	・	・	・
探 触 子	計測法 (b)								

[0142] 上述した様に、表5の線形回帰式係数表は、コンクリート厚D(例えば10cm、15cm、20cm、・・・50cm)毎に作成される。

そして、上式(2)、(4)において、 X_{jj} は $G_{ii,jj}(t)$ 波を用いて前記分析で得られた f_c 値であり、コンクリートモデル厚D毎に特定されている。

また、 Y_{jj} は、 $G_{ii,jj}(t)$ 波を収録した位置でコア抜きしたシリンダーのアムスラー試験機による圧縮破壊強度

る。

である。なお $Y_{jj} (jj=1 \sim n_D)$ は、ステップS43では外部より入力される。

[0143] ステップS43が完了すると、実施例2、3の前処理(最大エントロピー分析)は終了する。

[0144] 図47の前処理フローチャート(最大エントロピー分析)では、分析波 $GA_{ii, i1, j}(t)$ よりスペクトルを取り出す方法として最大エントロピー分析を用いている。ここで、実施例1の場合で示したように、最大エントロピー分析の代わりにフーリエ変換分析(FFT分析)を用いることも可能である。

[0145] 「実施例2、3の後処理フローチャート(最大エントロピー分析)」

次に、図48のフローチャートをも参照して、最大エントロピー分析を行う場合における実施例2、3を、ステップ毎に説明する。

なお、図47をも参照して説明した実施例2、3の前処理において、分析波 $GA_{ii, i1, j}(t)$ よりスペクトルを取り出す方法としてFFT分析を用いた場合には、図48で説明する後処理において、「 $SA_{ii, i1, j}(f)$ 」を「 $FA_{ii, i1, j}(f)$ 」と変更して、理解するべきである。

[0146] 図48(最大エントロピー分析を行う場合の実施例2、3の後処理フローチャート)のステップS51において、強度を計測したいコンクリート構造物の強度を計測したい位置で、図19(a)～(e)に示す計測法を、1対の発信及び受信探触子を用いて行うか、或いは、若しくは図19(b)の計測法を発信及び受信を1つの探触子を用いて行うことにより、受信波 $G(t)$ を取得する。

受信波 $G(t)$ は超音波発信毎に得られる受信波 $G_k(t)$ を加算平均して求める。

$$G(t) = \frac{1}{n_c} \sum_{k=1}^{n_c} G_k(t) \quad \dots \text{式E 3}$$

ここで、 n_c は所定値で1以上の整数である。

[0147] 受信波 $G(t)$ を取得したならば、ステップS52に進む。

ステップS52では、図47(実施例2、3の前処理フローチャート)のステップS43で作成した線形回帰式係数表(表5)から、 $\Delta t_{ii, i2}$ 、 $\Delta ta_{ii, i2}$ 、 $n5_{ii, i2}$ 、 $tg_{ii, i2}$ 、 $\alpha_{ii, i2}$ 、 $B_{ii, i2}$ 、 $\gamma_{ii, i2}$ を、分析装置のハードディスク25(図1)よりメモリ26に呼び出す。ここで、「ii」は、コンクリートモデルの厚さに関する添字(サフィックス)であり、「i2」は計測法に関

する添字である。

[0148] 添字 i_2 と、計測法との対比は、次の通りである。

$i_2=1:2$ 探触子計測法 図19(a)

$i_2=2:2$ 探触子計測法 図19(b)

$i_2=3:2$ 探触子計測法 図19(c)

$i_2=4:2$ 探触子計測法 図19(d)

$i_2=5:2$ 探触子計測法 図19(e)

$i_2=6:1$ 探触子計測法 図19(b) FiLTb(t)を採用

$i_2=7:1$ 探触子計測法 図19(b) FiLTa(t)を採用

[0149] 添字 ii については、図47のステップS41に関して説明されている。当該ステップS41の計測対象コンクリートの厚さ D を外部から入力すれば、この D に対応する添字 ii の値が分かる。

図47のステップS41において、どの計測法を採用したかにより、添字 i_2 の値が分かる。

そして、この確定した ii 、 i_2 で示される所定値 $\Delta t_{ii, i_2}$ 、 $\Delta ta_{ii, i_2}$ 、 $n5_{ii, i_2}$ 及び tg_{ii, i_2} で図7(a)、(b)の時刻関数FiLT(t)定義し、定義された時刻関数FiLT(t)を用いて、受信波 $G(t)$ より波 $GA(t)$ を切り出す。

$$GA(t) = \text{FiLT}(t)^{n5} \cdot G(t)$$

[0150] 前述した(A-3)式を用いて、最大エントロピー分析により、切り出し波 $GA(t)$ に対応するスペクトル $SA(f)$ を求める。そして、スペクトル $SA(f)$ の極大値(最大値)を示す振動数 fk を特定する。この特定は、自動であっても、オペレータによる手動であっても良い。

[0151] ここで、スペクトル $SA(f)$ から、極大値(最大値)を示す振動数 fk を特定するに際して、

実施例2における計測法(a)であれば、図22又は図23の様に行い、
 実施例2における計測法(b)であれば、図25又は図26の様に行い、
 実施例2における計測法(c)であれば、図32又は図33の様に行い、
 実施例2における計測法(d)であれば、図29又は図30の様に行い、

実施例2における計測法(e)であれば、図35の様に行い、
実施例3の計測であれば、図37の様に行う。

- [0152] スペクトルSA(f)の極大値(最大値)を示す振動数fkが特定されたならば、値が確定しているii、i2を用いて、線形回帰式を

$$\alpha_{ii} = \alpha_{ii, i2} \cdot fk - \beta_{ii, i2}$$

を決定する。

決定された線形回帰式を図38のように表現すれば(なお、図38のfcが、上記線形回帰式のfkに相当する)、図38の横軸の振動数fkの位置に対応する縦軸*印位置の値を読み取る。そして、この読み取り値が、計測対象コンクリート構造物の計測位置における圧縮強度 σ_u N/mm²となる。

- [0153] このステップS52が完了すれば、実施例2、3が終了する。
[0154] 図示の実施形態、実施例は、あくまでも例示であり、本発明の技術的範囲を限定する趣旨の記述ではない旨を付記する。

図面の簡単な説明

- [0155] [図1]本発明の実施形態に係る超音波装置を示すブロック図。
[図2]図1の実施形態で用いられるステップ型電圧発生器のブロック図。
[図3]図1の実施形態で用いられる発信探触子のブロック図。
[図4]図1の実施形態で用いられる受信探触子のブロック図。
[図5]実施例1で用いられるコンクリートシリンダーモデルを示す図。
[図6]実施例1における受信波の1例を示す図。
[図7]受信波の切り出しに使用される時刻関数を例示する図。
[図8]縦波切り出し波とそのスペクトルを示す図。
[図9]圧縮強度-スペクトル極大値位置振動数特性の例を示す図。
[図10]広帯域超音波を説明する図。
[図11]縦波を切り出した場合のスペクトルを例示する図。
[図12]シリンダーモデルに生じる各種伝達波を示す図。
[図13]シリンダーモデルの各種受信波を時間軸上で模式的に示す図。
[図14]最初の起生波(縦波)を図7(b)で示す時刻関数を用いて切り出した時のスペ

クトル比較図。

[図15]図13で示すモード変換波と表面波を切り出したスペクトル比較図。

[図16]フーリエ変換ではなく最大エントロピー法でスペクトルを求めた場合のスペクトル比較図の1例を示す図。

[図17]最大エントロピー法を用いて縦波のスペクトルを求めた場合のスペクトル比較図

[図18]音速値 V_p と σ_u との関係を示す図。

[図19]実構造物で想定される計測法を示す図。

[図20]コンクリートモデルを例示する図。

[図21]コンクリートモデルの他の例を示す図。

[図22]図19(a)で示す透過計測で図20(a)のモデルを計測した場合の最大エントロピー分析によるスペクトル比較図。

[図23]図19(a)で示す透過計測で図21(b)のモデルを計測した場合の最大エントロピー分析によるスペクトル比較図。

[図24]実施例2の計測法(a)において各種受信波を時間軸上で模式的に示す図。

[図25]計測法(b)で得た受信波のスペクトル比較図。

[図26]計測法(b)で得た受信波のスペクトル比較図。

[図27]計測法(b)の反射波計測において各種受信波を時間軸上で模式的に示す図。

[図28]計測法(c)及び計測法(d)による各種受信波を時間軸上で模式的に示す図。

[図29]図20(a)のモデルで計測して表面波を切り出し最大エントロピー分析で得たスペクトル比較図。

[図30]図21(b)のモデルで計測して表面波を切り出し最大エントロピー分析で得たスペクトル比較図。

[図31]図29及び図30で測点3の前記振動数が測点1、2の振動数と若干異なっている理由を説明するための図。

[図32]計測法(c)を用いて最大エントロピー法で分析して得たスペクトル比較図。

[図33]計測法(c)を用いて最大エントロピー法で分析して得たスペクトル比較図。

[図34]受信波を直接に最大エントロピー分析した結果の中で図33に対応するスペクトル比較図。

[図35]計測法(e)を図21(b)のモデルに適用して得たスペクトル比較図。

[図36]図19(b)で示す計測を1探触子で行った場合に測点1〜3の受信波を比較表示した図。

[図37]図36の受信波を最大エントロピー分析することで得たスペクトル比較図。

[図38]圧縮強度と実物を計測して得られたスペクトル極大値位置振動数との関係を示す図9と同様な特性図。

[図39]重複反射波の共振の1次振動数とスペクトルの極大値位置振動数との関係を示す図。

[図40]コンクリートモデルのパラメータとしての厚さを示す図。

[図41]コア抜きしたコンクリートシリンダーを示す図。

[図42]発信探触子と受信探触子を一緒にした発信／受信共用探触子のブロック図。

[図43]実施例1のフーリエ変換分析を行う場合の前処理を示すフローチャート。

[図44]実施例1のフーリエ変換分析を行う場合の後処理を示すフローチャート。

[図45]実施例1の最大エントロピー分析を行う場合の前処理を示すフローチャート。

[図46]実施例1の最大エントロピー分析を行う場合の後処理を示すフローチャート。

[図47]実施例2、3の最大エントロピー分析を行う場合の前処理を示すフローチャート。

[図48]実施例2、3の最大エントロピー分析を行う場合の後処理を示すフローチャート。

符号の説明

- [0156] 4・・・発信探触子
- 5・・・受信探触子
- 11・・・解析装置
- 12・・・表示装置
- 15・・・アンプ回路
- 16・・・フィルタ回路

- 17・・・ADC(アナログデジタル変換回路)
- 18・・・ゲートアレイ
- 19・・・CPU(中央演算装置)
- 23・・・電流供給回路
- 24・・・ハイパスフィルタ
- 25・・・HD(ハードディスク)
- 26・・・メモリ
- 27・・・キーボード
- 28・・・振動子
- 29・・・振動子
- 30・・・被探知体
- 31・・・同軸ケーブル

請求の範囲

- [1] コンクリートモデルに設けた発信探触子から広帯域超音波を複数回発信し、広帯域超音波を発信する度毎に受信探触子で受信し、受信された受信波を加算平均する受信波取得工程と、

受信波取得工程で取得された受信波に予め定義された時刻関数を乗じて特定の部分を切り出し、切り出し波を取得する切り出し波取得工程と、

切り出し波取得工程で取得された切り出し波にフーリエ変換分析或いは最大エントロピー分析を行い、スペクトルを求めるスペクトル取得工程と、

スペクトル取得工程で求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数を決定する極大値位置振動数決定工程と、

スペクトルを求めたコンクリートモデルの圧縮強度を計測する圧縮強度計測工程、とを含み、

設計強度の異なる複数のコンクリートモデルについて、前記受信波取得工程、切り出し波取得工程、スペクトル取得工程、極大値位置振動数決定工程、圧縮強度計測工程を繰り返し、前記複数のコンクリートモデルの各々における前記スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度から、スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度との線形回帰式を決定する工程と、

圧縮強度を求めたいコンクリートより前記コンクリートモデルと同一形状のモデルを成形し、圧縮強度を求めたいコンクリートのモデルに対して前記受信波取得工程、切り出し波取得工程、スペクトル取得工程、極大値位置振動数決定工程を行い、求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数と前記線形回帰式から圧縮強度を求めたいコンクリートの圧縮強度を決定する工程、

とを有することを特徴とするコンクリートの圧縮強度測定方法。

- [2] コンクリートモデルに設けた発信探触子から広帯域超音波を複数回発信し、広帯域超音波を発信する度毎に前記受信探触子で受信し、受信された受信波を加算平均する受信波取得工程と、

受信波取得工程で取得された受信波に、前記発信探触子と前記受信探触子との相対的な位置関係とコンクリートモデルの厚さとにより形状が定義される時刻関数を

乗じて特定の部分を切り出し、切り出し波を取得する切り出し波取得工程と、

切り出し波取得工程で取得された切り出し波にフーリエ変換分析或いは最大エントロピー分析を行い、スペクトルを求めるスペクトル取得工程と、

スペクトル取得工程で求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数を決定する極大値位置振動数決定工程と、

スペクトルを求めたコンクリートモデルの圧縮強度を計測する圧縮強度計測工程、とを含み、

設計強度と厚さが異なる複数のコンクリートモデルについて、発信探触子及び受信探触子のコンクリートモデルへの取付位置の相対位置関係を同一にして、同一の計測法により受信波を取得するという条件下で、前記受信波取得工程、切り出し波取得工程、スペクトル取得工程、極大値位置振動数決定工程、圧縮強度計測工程を繰り返し、前記複数のコンクリートモデルの各々における前記スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度から、スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度との線形回帰式を決定する工程と、

圧縮強度を求めたいコンクリート構造物に発信探触子及び受信探触子を取り付け、発信探触子と受信探触子の取付位置の相対位置関係は前記コンクリートモデルに取り付けた場合と同一にして、前記コンクリートモデルで受信したのと同じ計測法により受信波を取得する様にせしめ、圧縮強度を求めたいコンクリート構造物の発信探触子及び受信探触子の取付位置とコンクリート厚さから時刻関数の形状を定義し、圧縮強度を求めたいコンクリート構造物に対して前記受信波取得工程、切り出し波取得工程、スペクトル取得工程、極大値位置振動数決定工程を行い、求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数と前記線形回帰式から圧縮強度を求めたいコンクリート構造物の圧縮強度を決定する工程、

とを有することを特徴とするコンクリート構造物の圧縮強度測定方法。

- [3] 切り出し波取得工程で受信波から切り出される前記特定の部分は表面波であり、前記時刻関数は前記相対位置毎に予め形状が定義されている請求項2のコンクリート構造物の圧縮強度測定方法。

- [4] 広帯域超音波を発信する発信探触子と、広帯域超音波を受信する受信探触子と、

記憶ユニットと、受信された広帯域超音波を処理する処理ユニットとを有しており、該処理ユニットは、

受信探触子で受信された受信波を加算平均して受信波を取得し、取得された受信波に予め定義された時刻関数を乗じて特定の部分を切り出して、切り出し波を取得し、

取得された切り出し波にフーリエ変換分析或いは最大エントロピー分析を行い、スペクトルを求め、

求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数と、スペクトルを求めたコンクリートモデルの圧縮強度とを記憶し、設計強度の異なる複数のコンクリートモデルにおける前記スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度から、スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度との線形回帰式を決定して記憶ユニットに記憶し、

圧縮強度を求めたいコンクリートについて、前記コンクリートモデルに対するのと同じの処理を行い、求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数と、記憶ユニットに記憶された前記線形回帰式から、圧縮強度を求めたいコンクリートの圧縮強度を決定する、

制御を行う様に構成されていることを特徴とするコンクリートの圧縮強度測定装置。

- [5] 広帯域超音波を発信する発信探触子と、広帯域超音波を受信する受信探触子と、記憶ユニットと、受信された広帯域超音波を処理する処理ユニットとを有しており、該処理ユニットは、

受信探触子で受信された受信波に、前記発信探触子と前記受信探触子との相対的な位置関係とコンクリートモデルの厚さとにより形状が定義される時刻関数を乗じて特定の部分を切り出して、切り出し波を取得し、

取得された切り出し波にフーリエ変換分析或いは最大エントロピー分析を行い、スペクトルを求め、

設計強度と厚さが異なる複数のコンクリートモデルについて、発信探触子及び受信探触子のコンクリートモデルへの取付位置の相対位置関係を同一にして、同一の計測法により受信波を取得するという条件下で、前記複数のコンクリートモデルの各

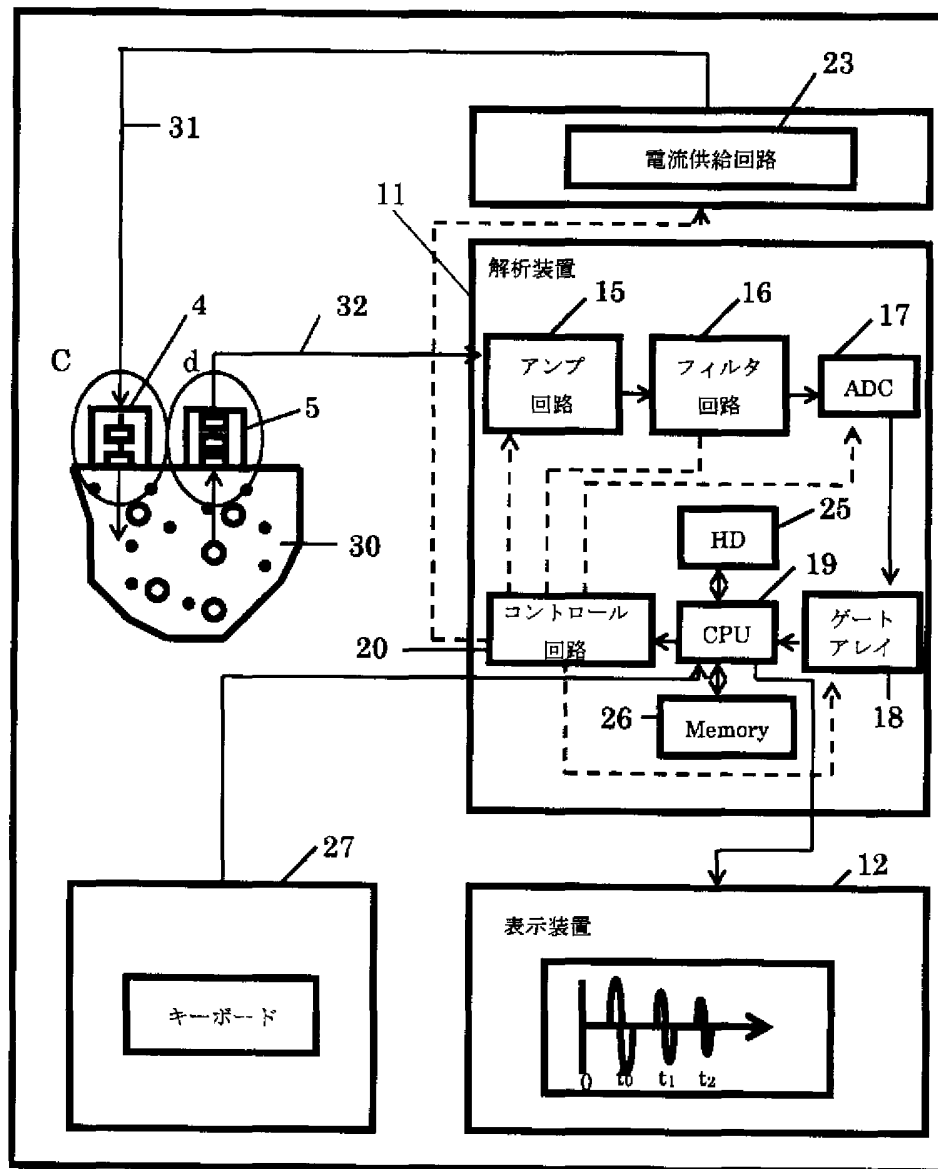
々について求めた前記スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度から、スペクトルの極大値を示す位置の振動数と圧縮強度との線形回帰式を決定して記憶ユニットに記憶し、

圧縮強度を求めたいコンクリート構造物には、発信探触子と受信探触子の取付位置の相対位置関係を前記コンクリートモデルと同一にして、前記コンクリートモデルで受信したのと同じの計測法により受信波を取得する様に発信探触子及び受信探触子を取り付けられており、圧縮強度を求めたいコンクリート構造物の発信探触子及び受信探触子の取付位置とコンクリート厚さから受信波を切り出す時刻関数の形状を定義し、圧縮強度を求めたいコンクリート構造物に対して前記コンクリートモデルに対するのと同じの処理を行い、求められたスペクトルの極大値を示す位置の振動数と、記憶ユニットに記憶された圧縮強度を求めたいコンクリート構造物の厚みと同一厚さの前記線形回帰式とから、圧縮強度を求めたいコンクリート構造物の圧縮強度を決定する、

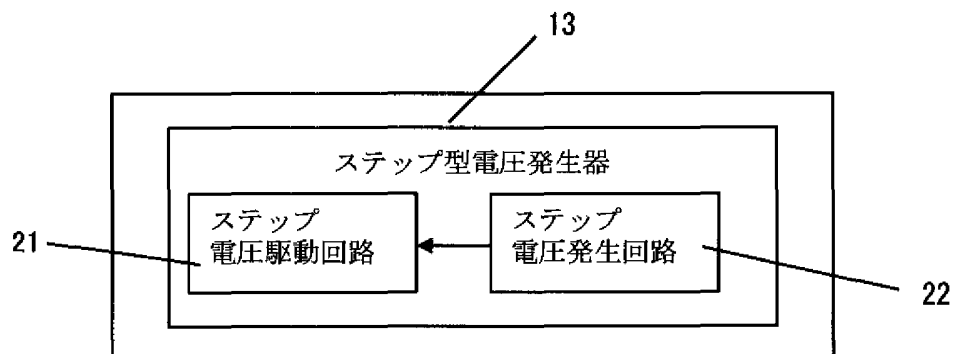
制御を行う様に構成されていることを特徴とするコンクリート構造物の圧縮強度測定装置。

- [6] 発信探触子と受信探触子に代えて、広帯域音波を発信する機能と受信する機能を共有する探触子を有している請求項5のコンクリート構造物の圧縮強度測定装置。
- [7] 受信波から表面波を切り出し、該切り出しで用いられる時刻関数は前記相対位置毎に予め形状が定義されている請求項5のコンクリート構造物の圧縮強度測定装置。

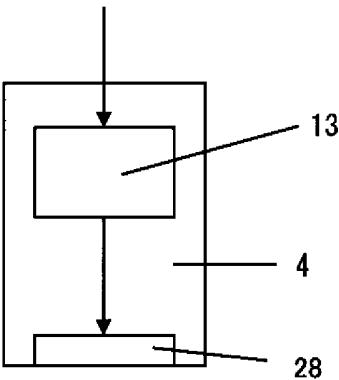
[図1]



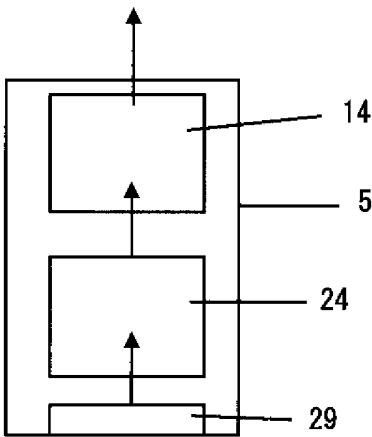
[図2]



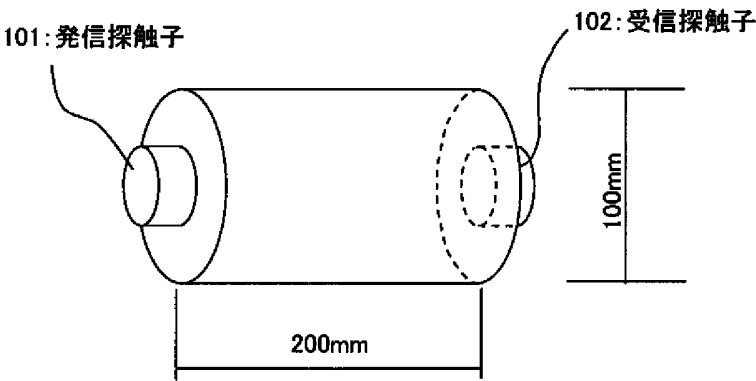
[図3]



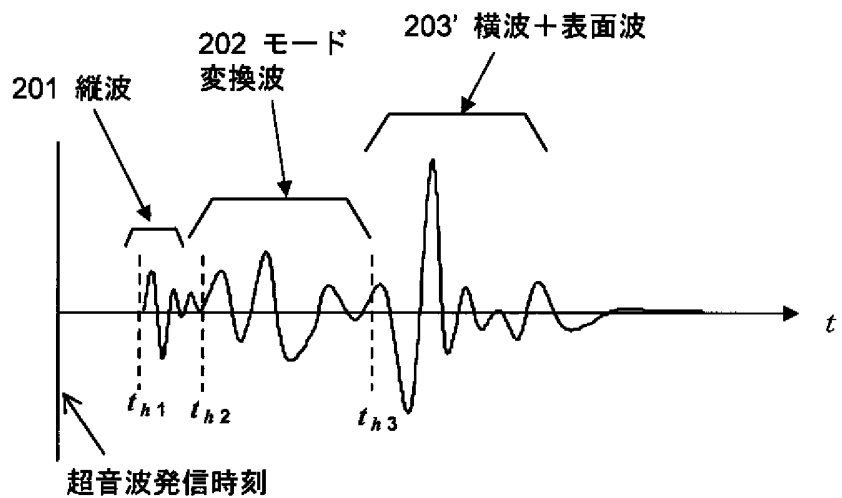
[図4]



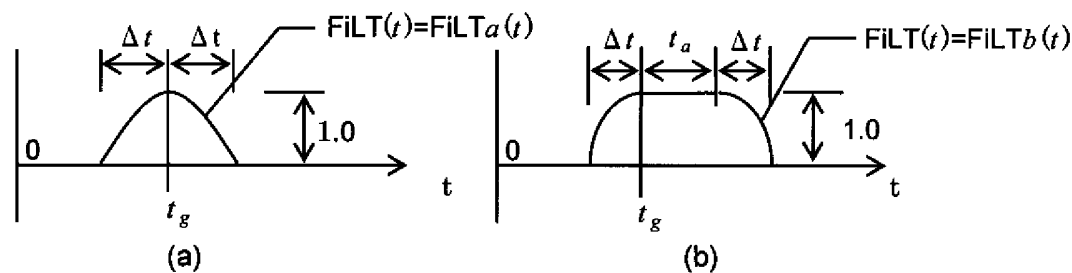
[図5]



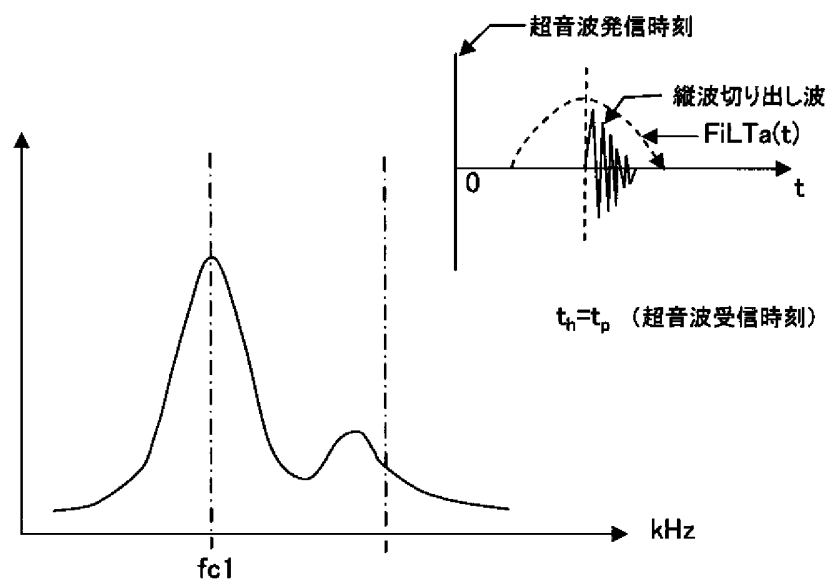
[図6]



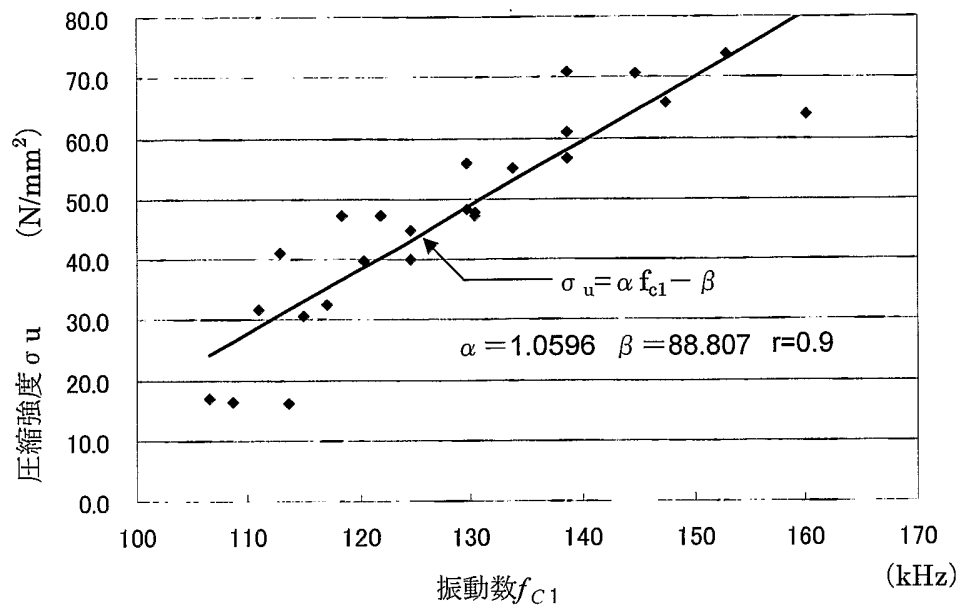
[図7]



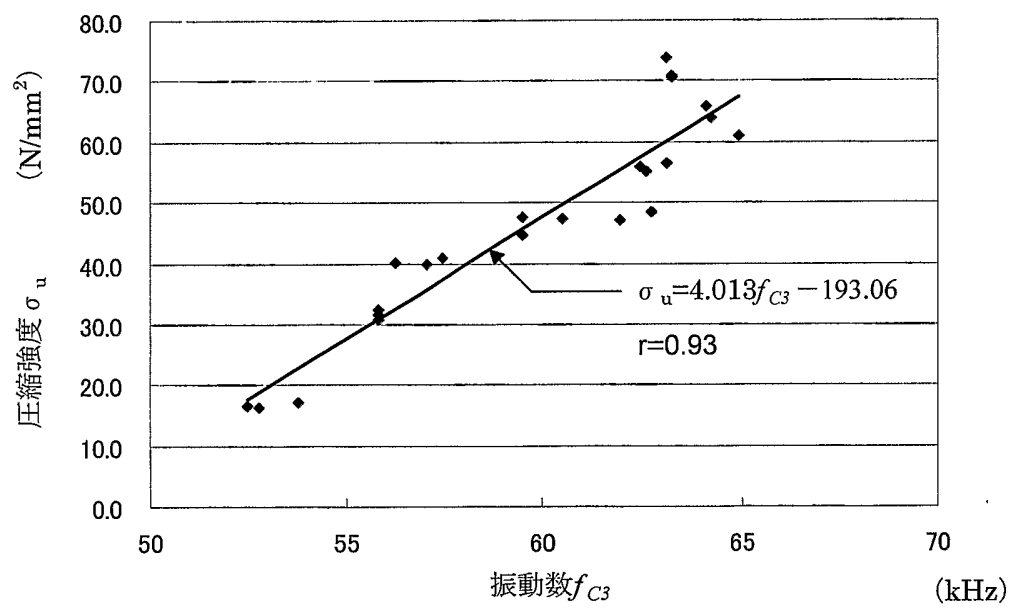
[図8]



4/21



(a)



(b)

図 9

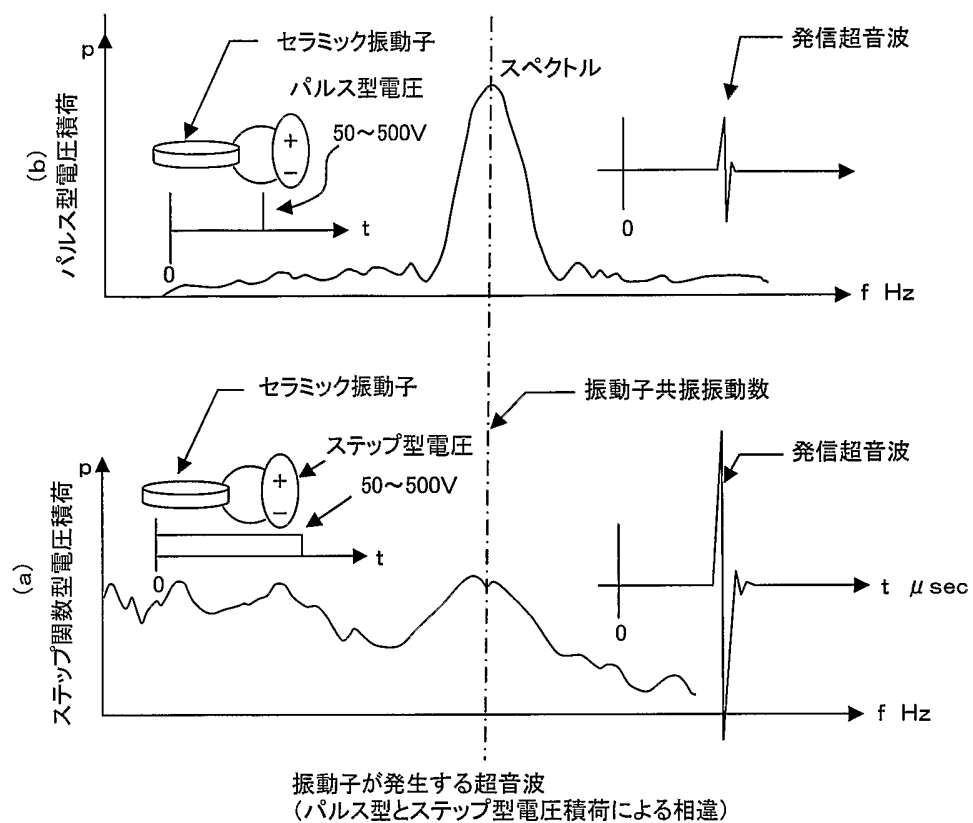


図10

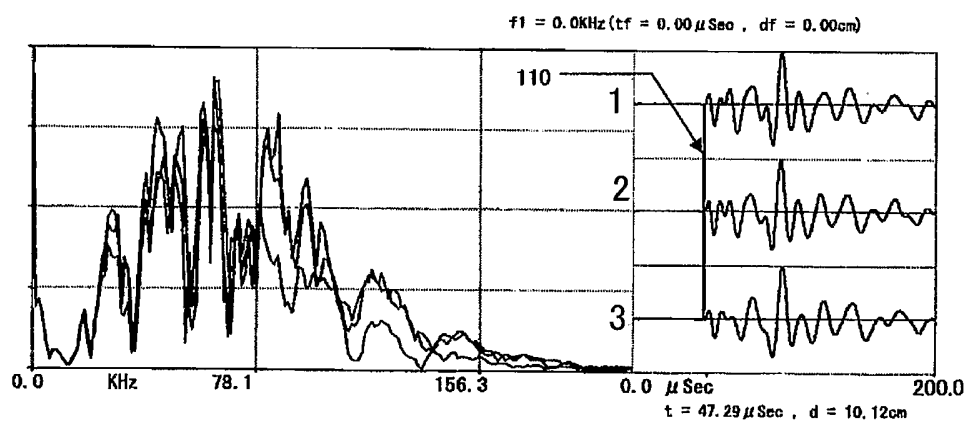


図11

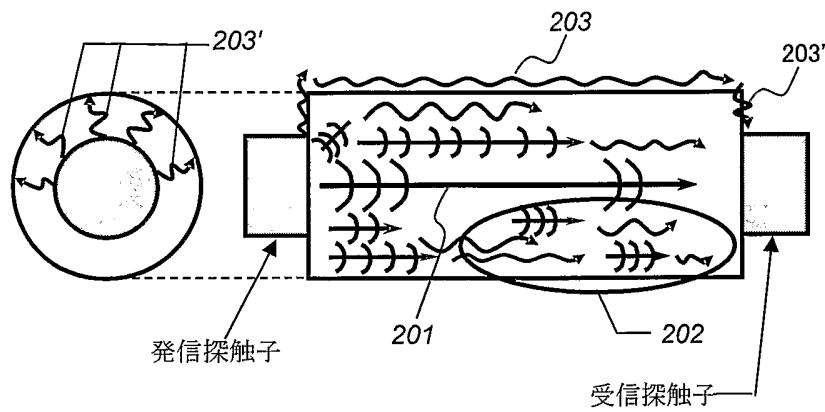


図 1 2

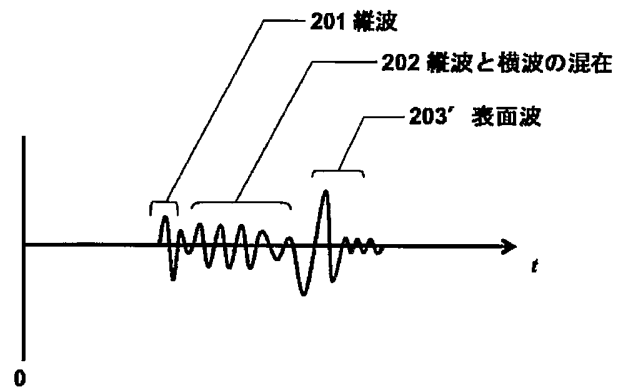


図 1 3

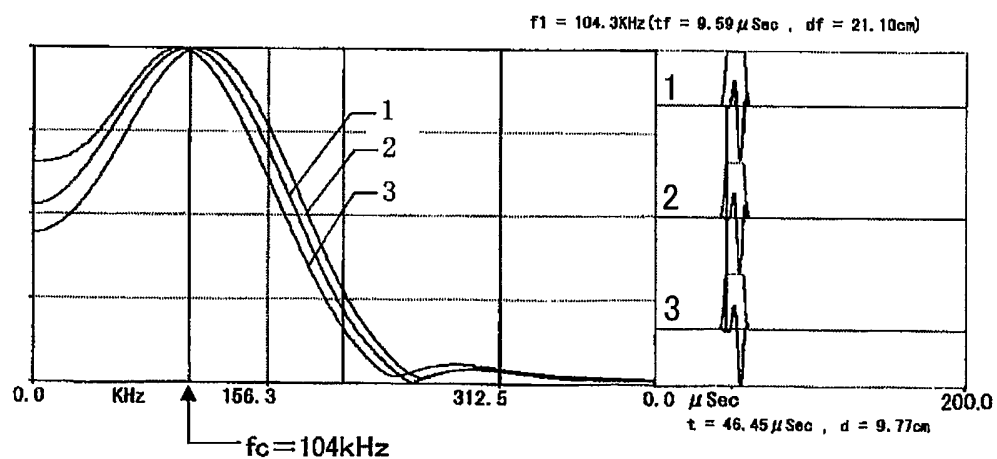


図 1 4

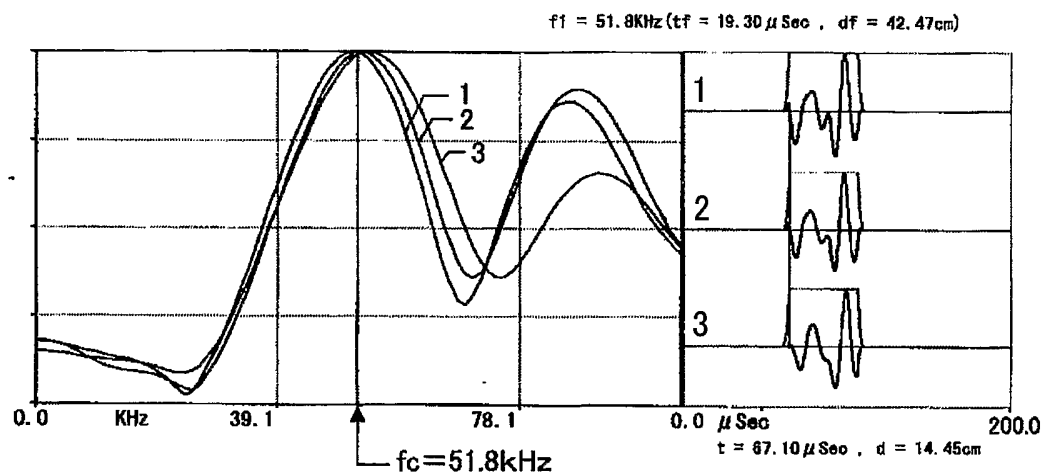


図15

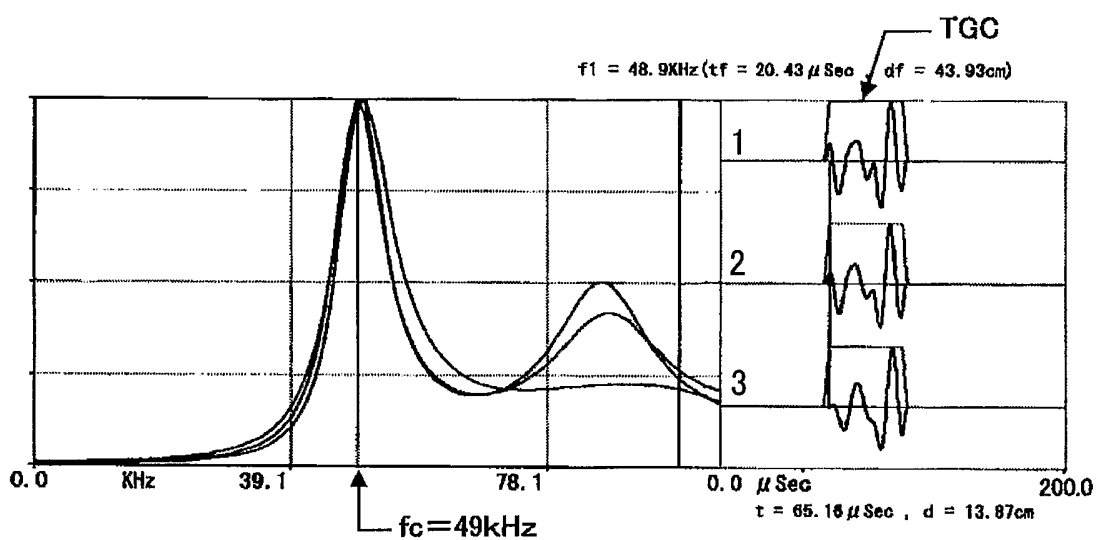


図16

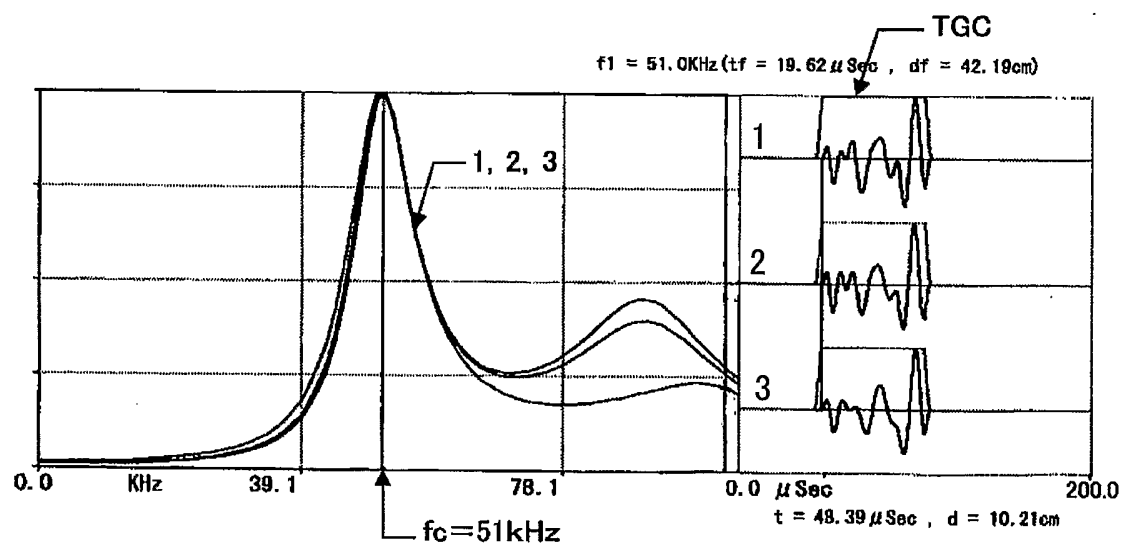


図17

8/21

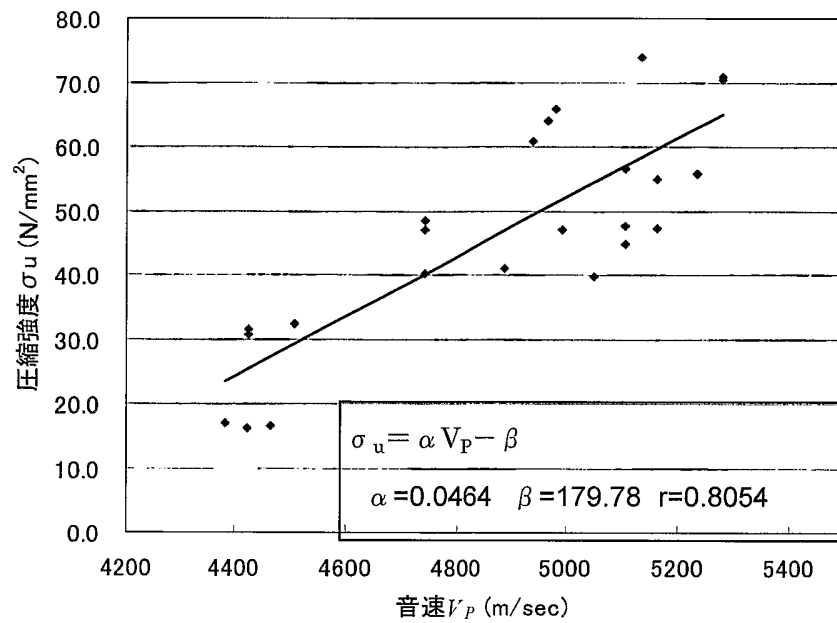


図18

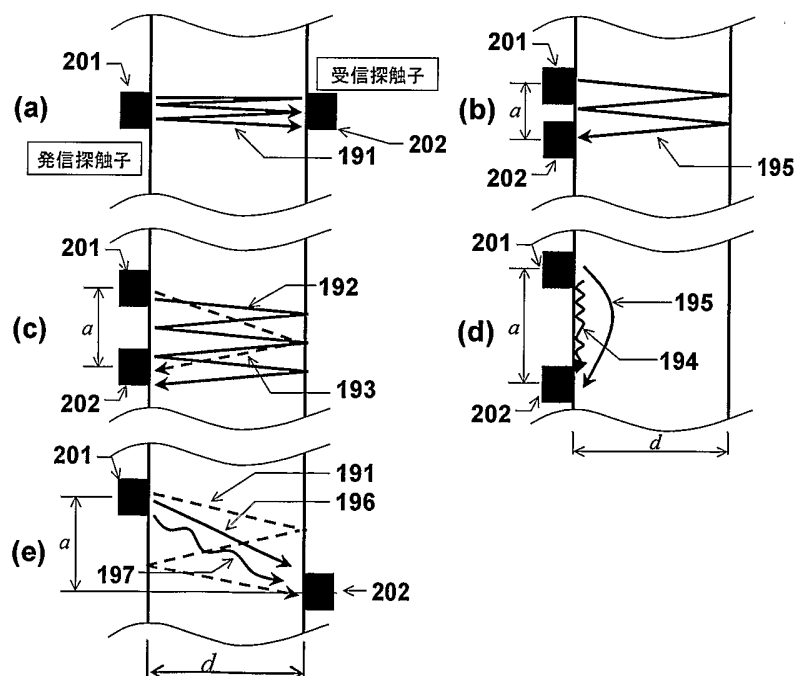
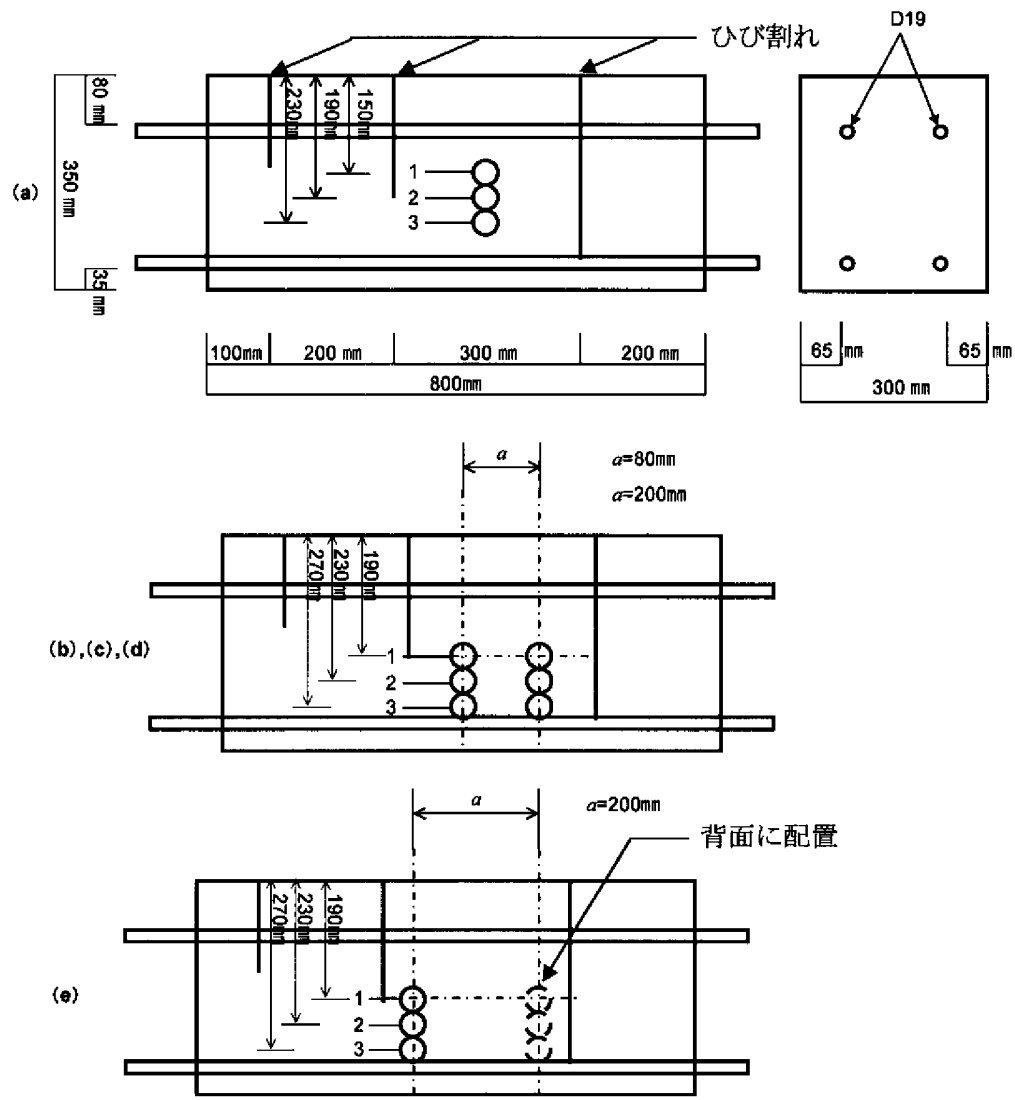


図19

[図20]



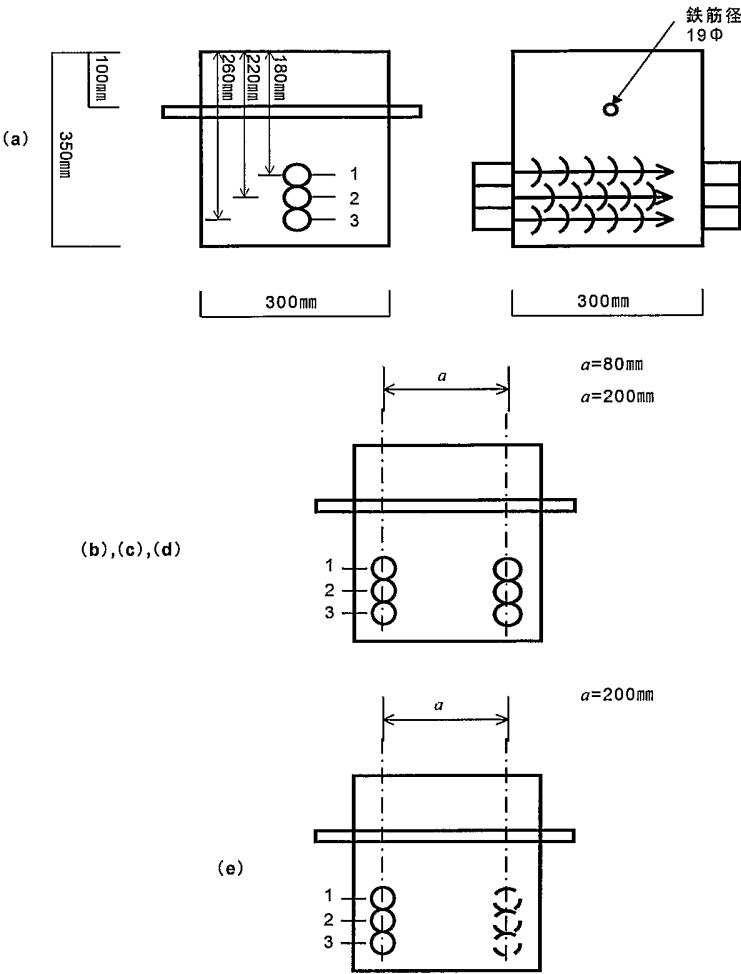


図21

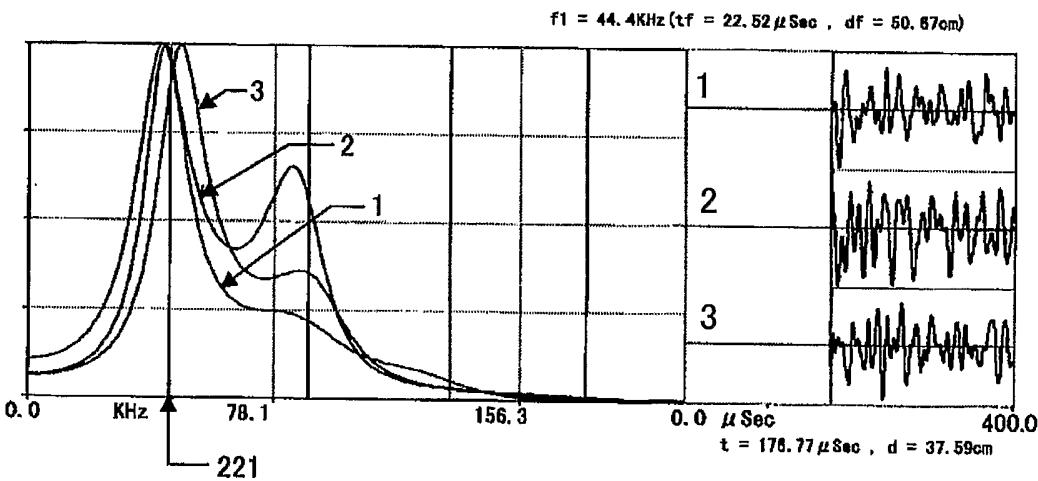


図22

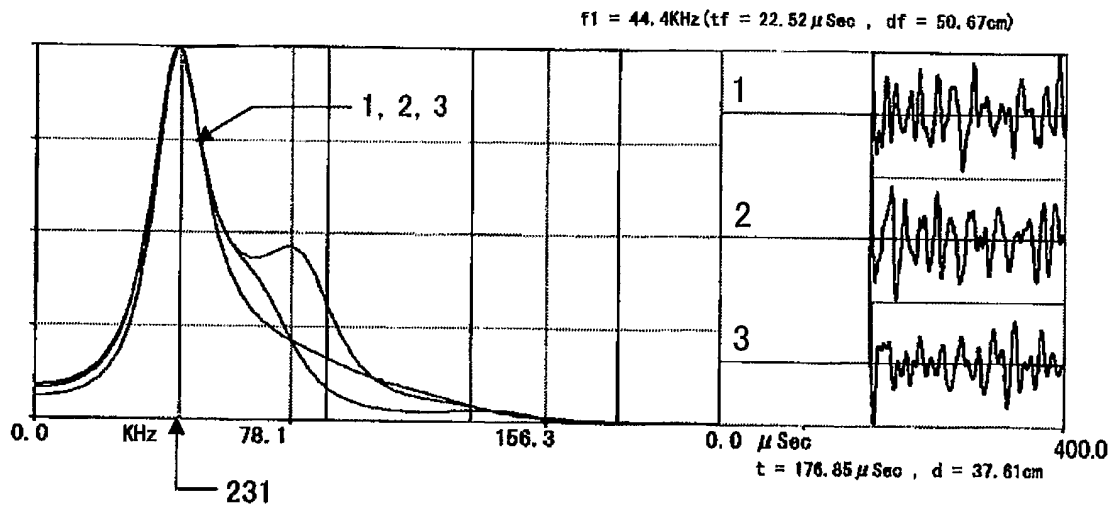


図23

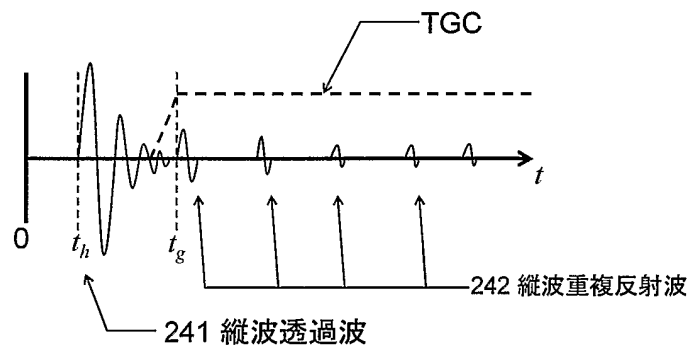


図24

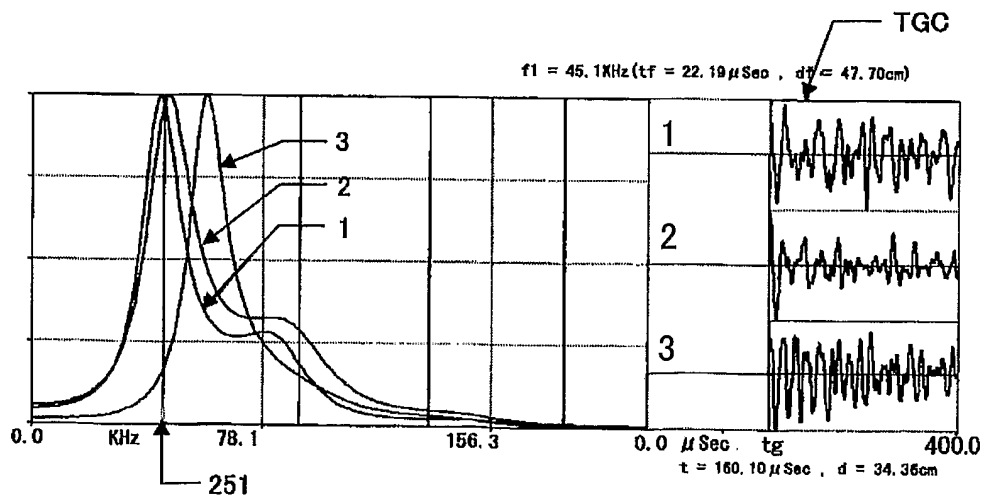


図25

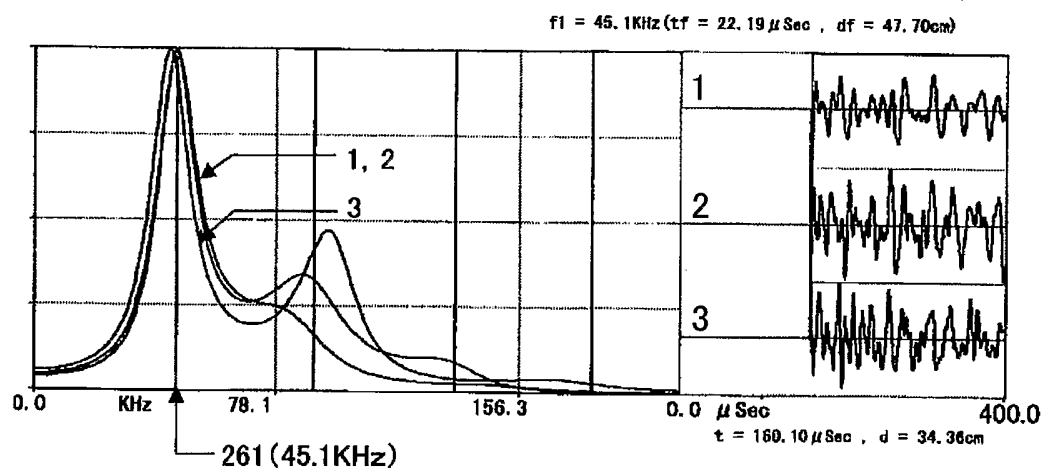


図26

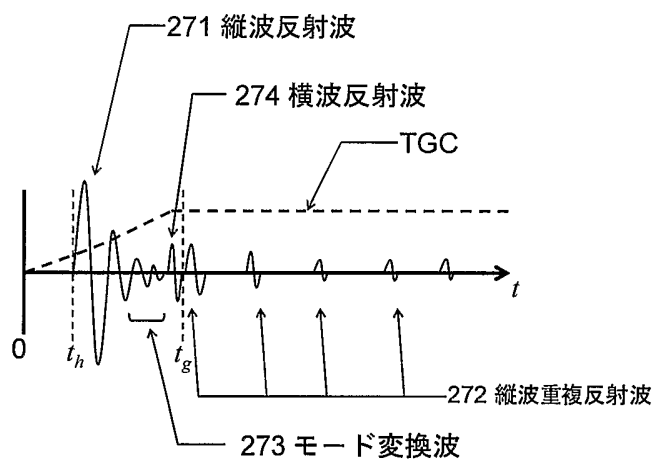


図27

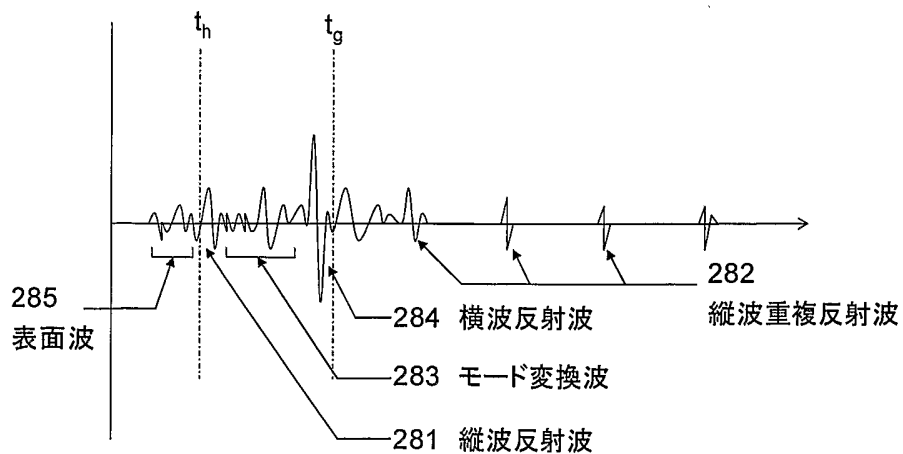


図28

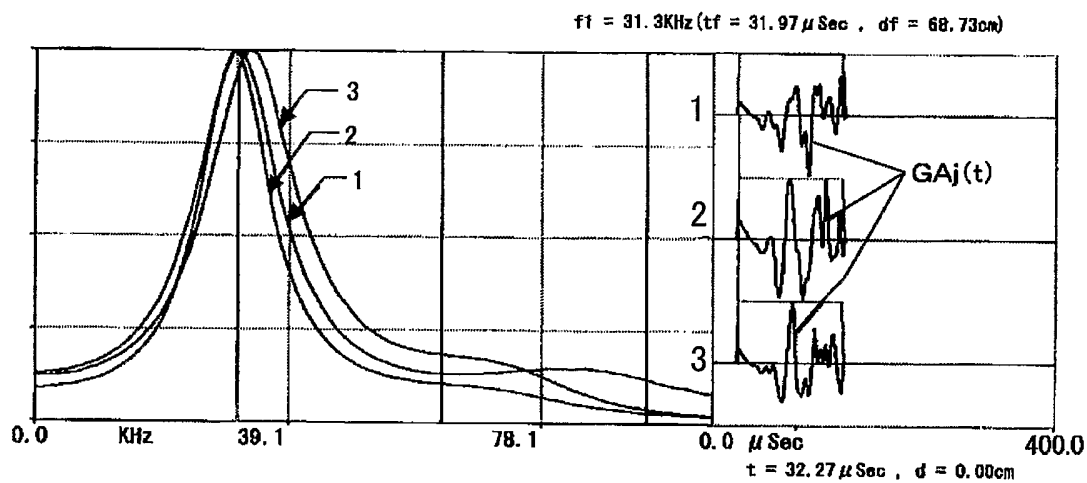


図29

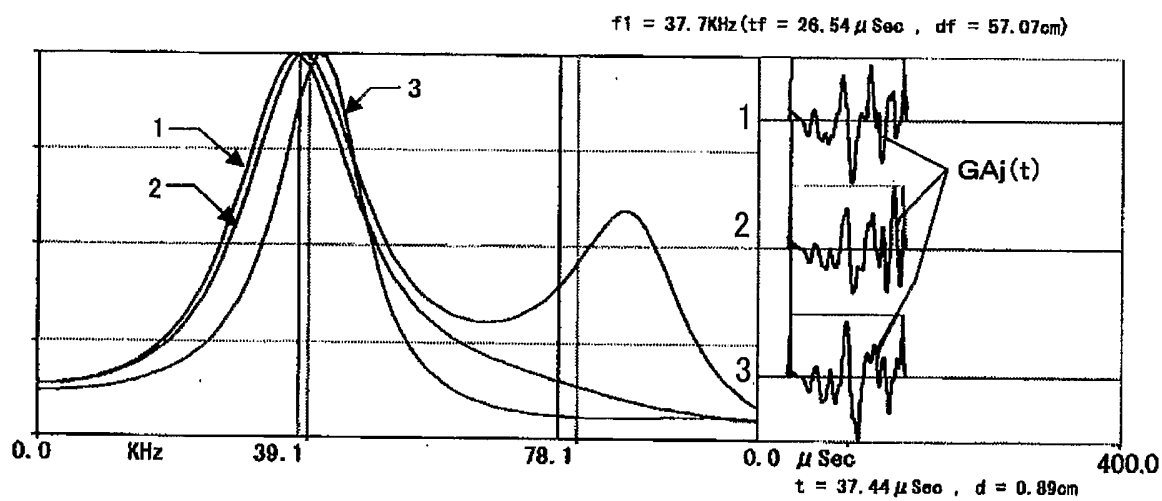


図30

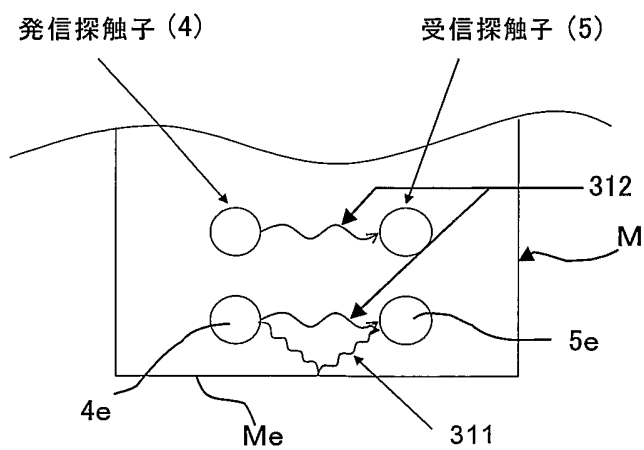


図31

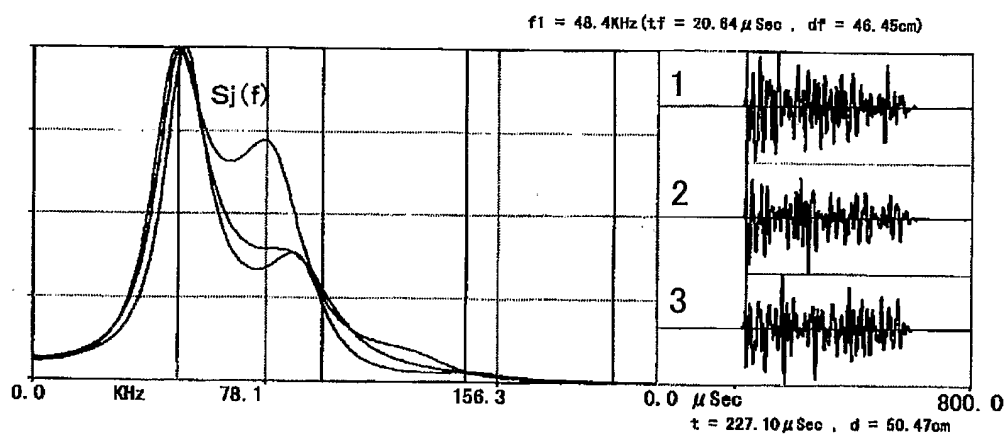


図32

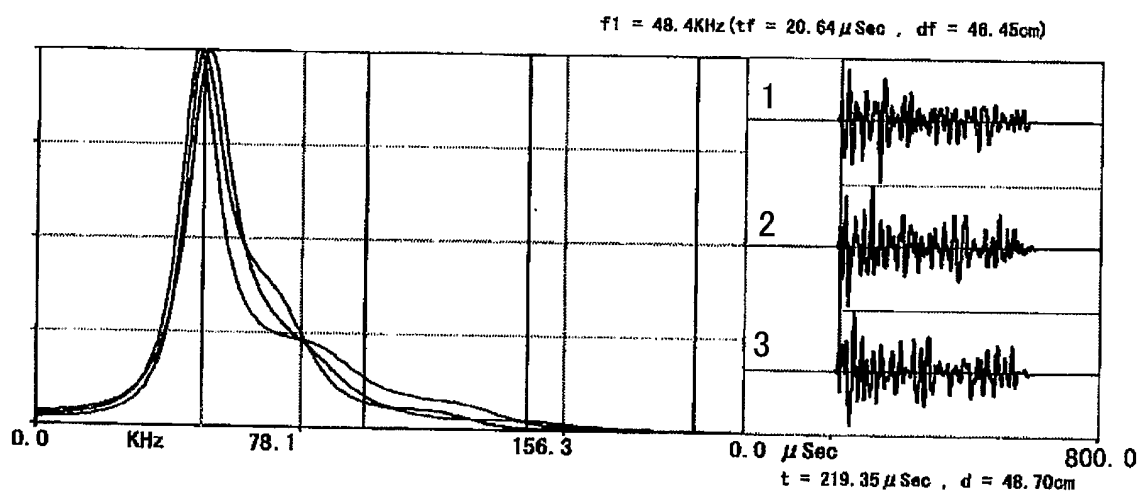


図33

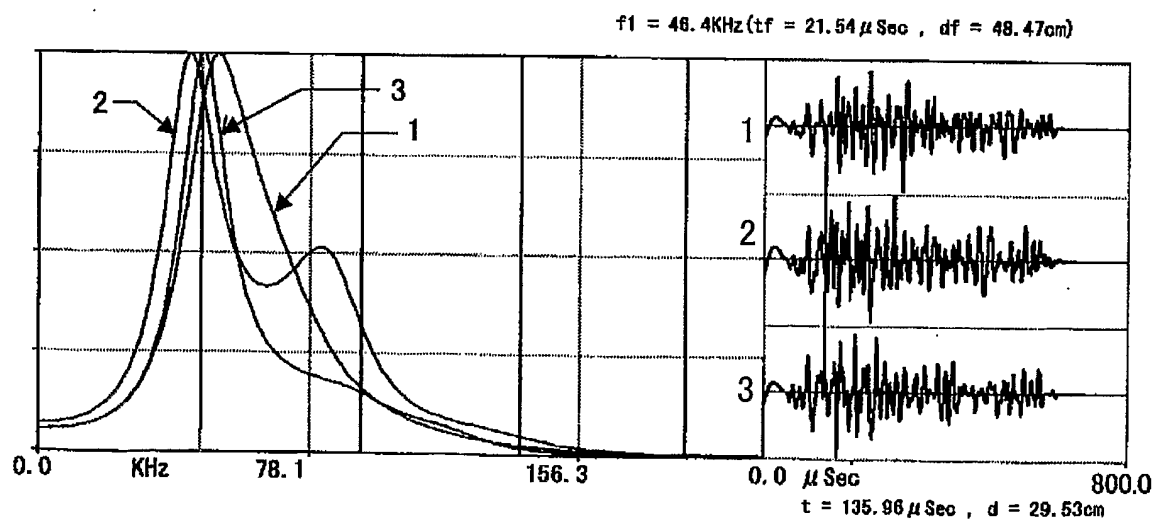


図34

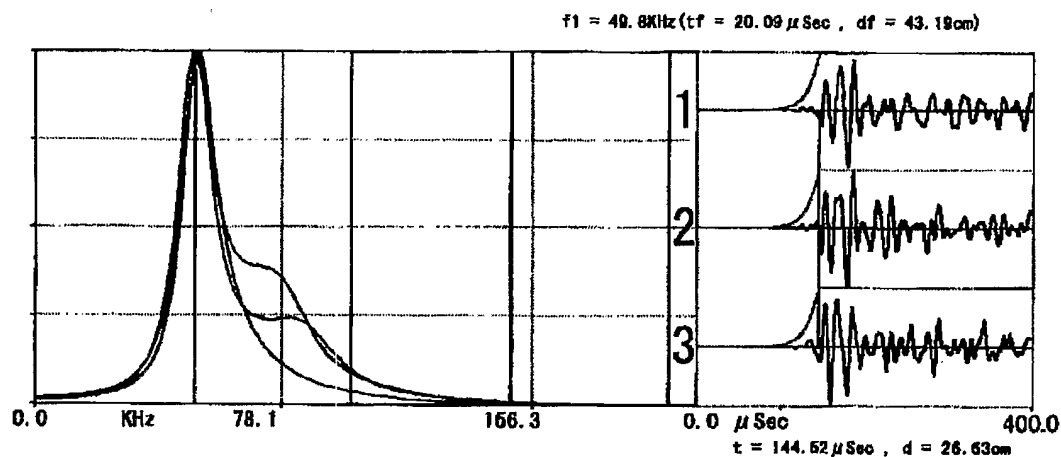


図35

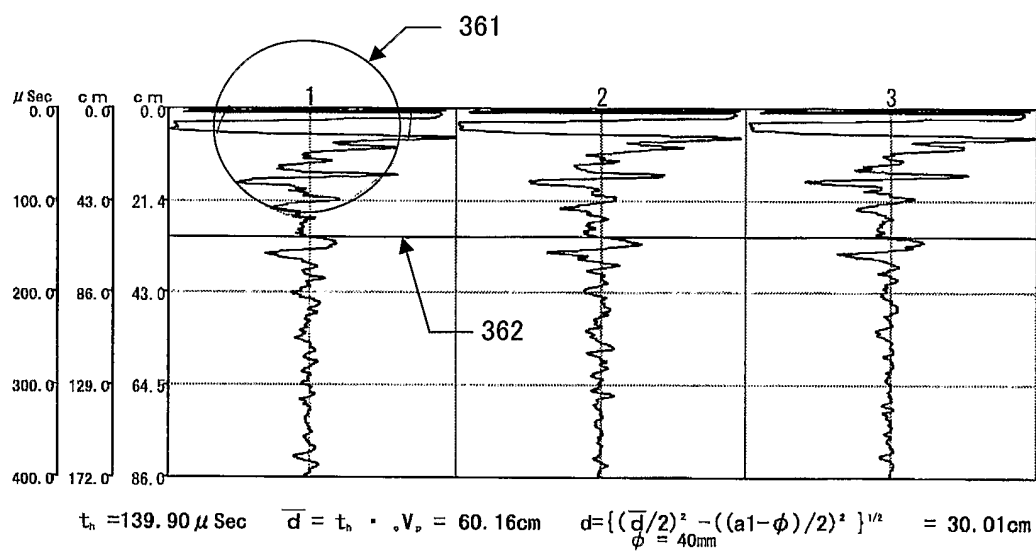


図36

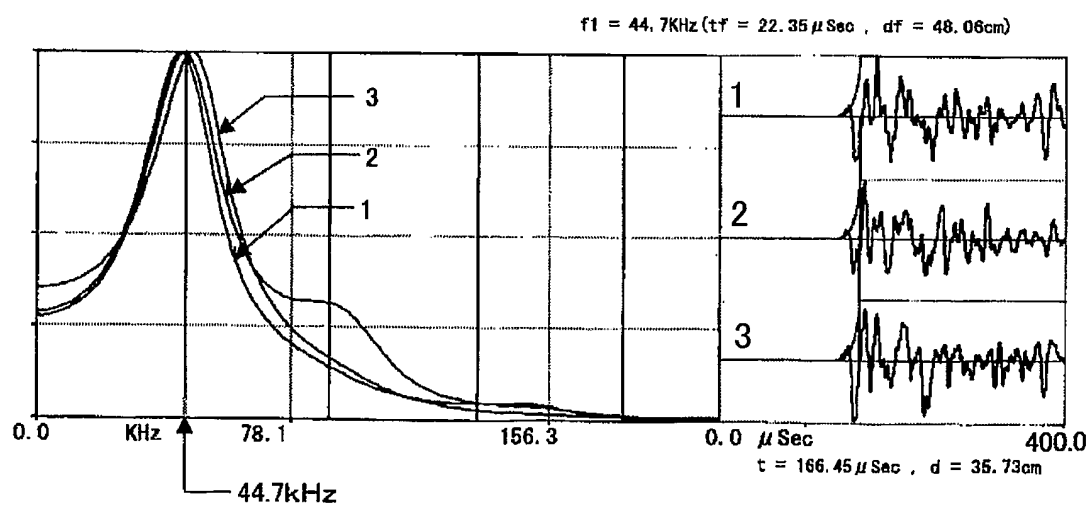
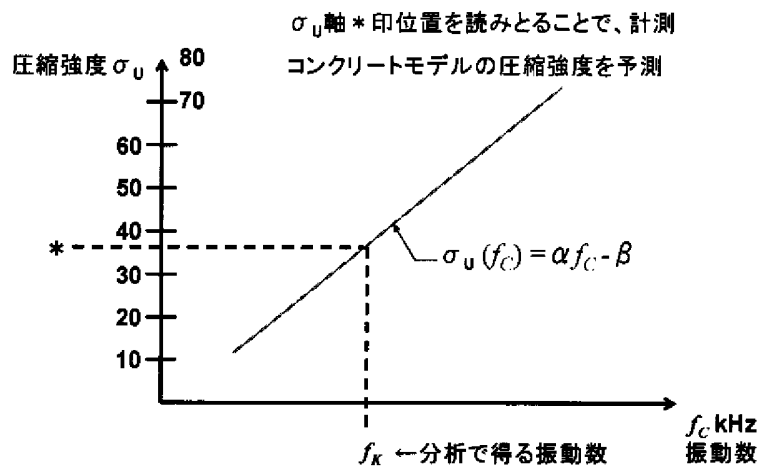
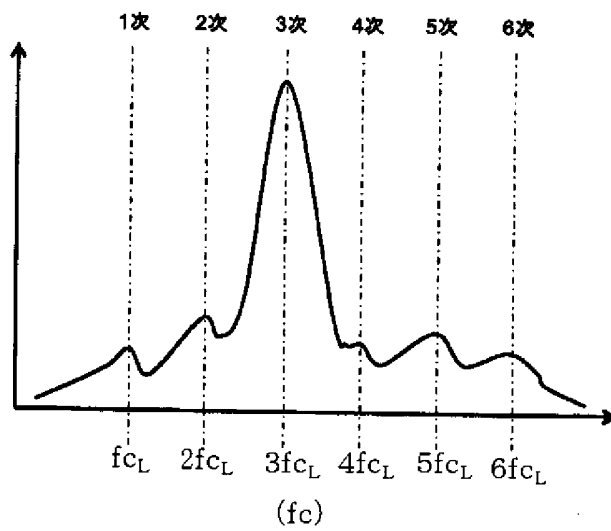


図37

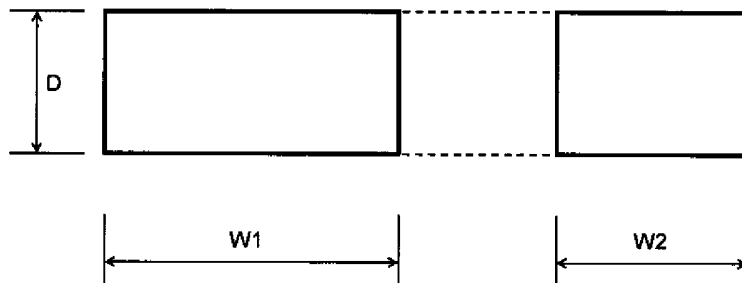
[図38]



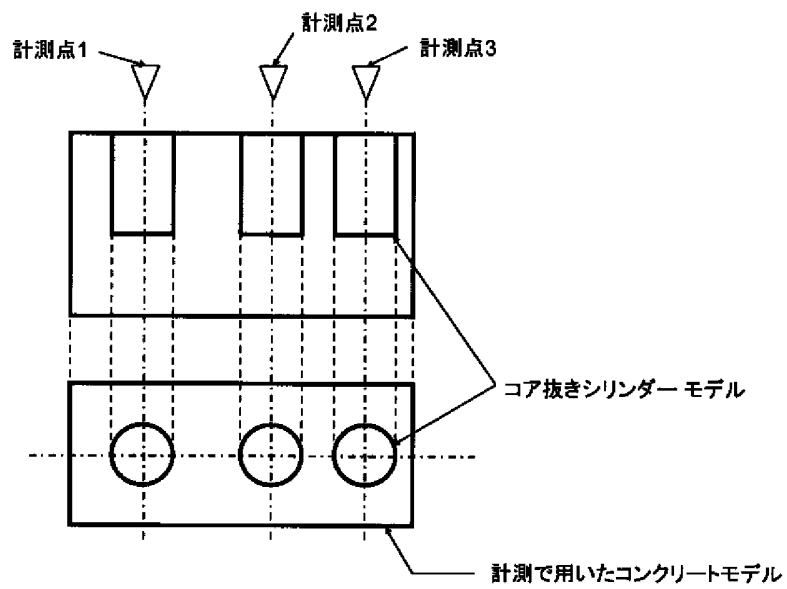
[図39]



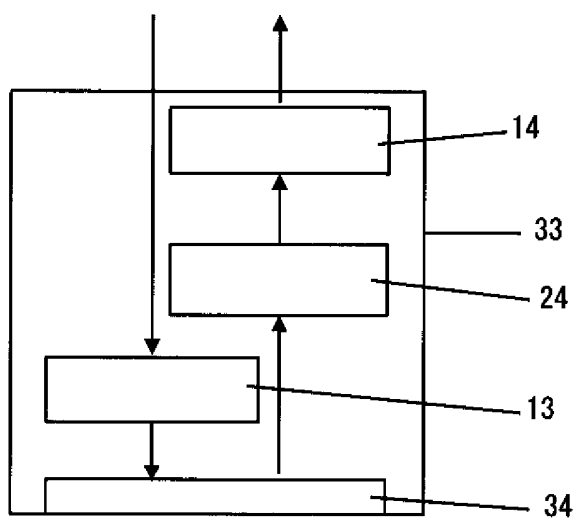
[図40]



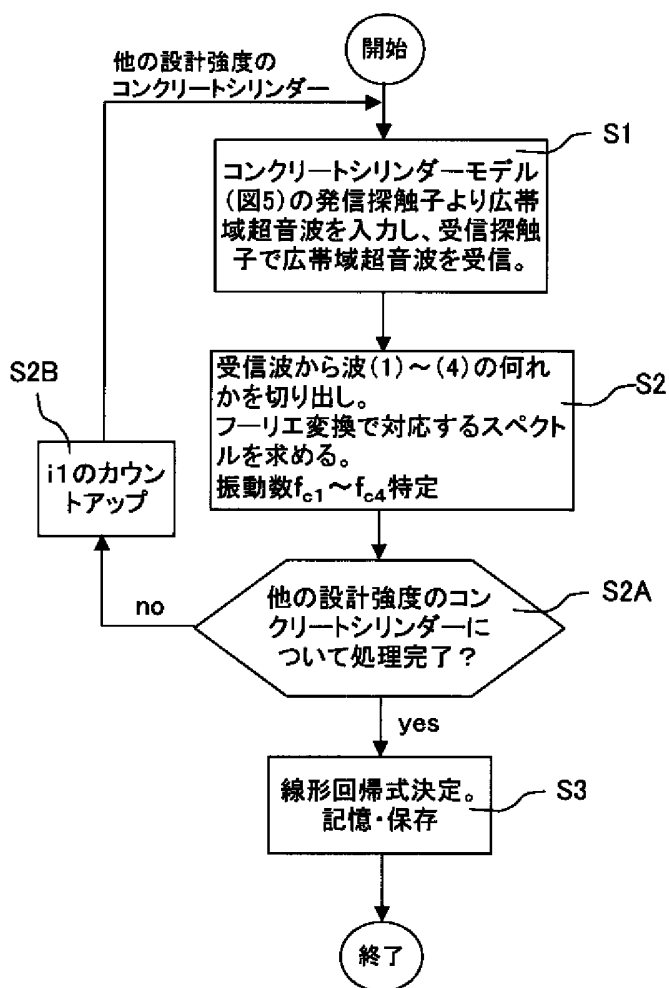
[図41]



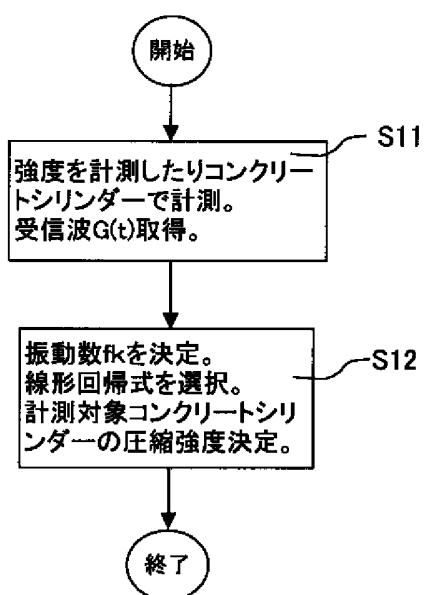
[図42]



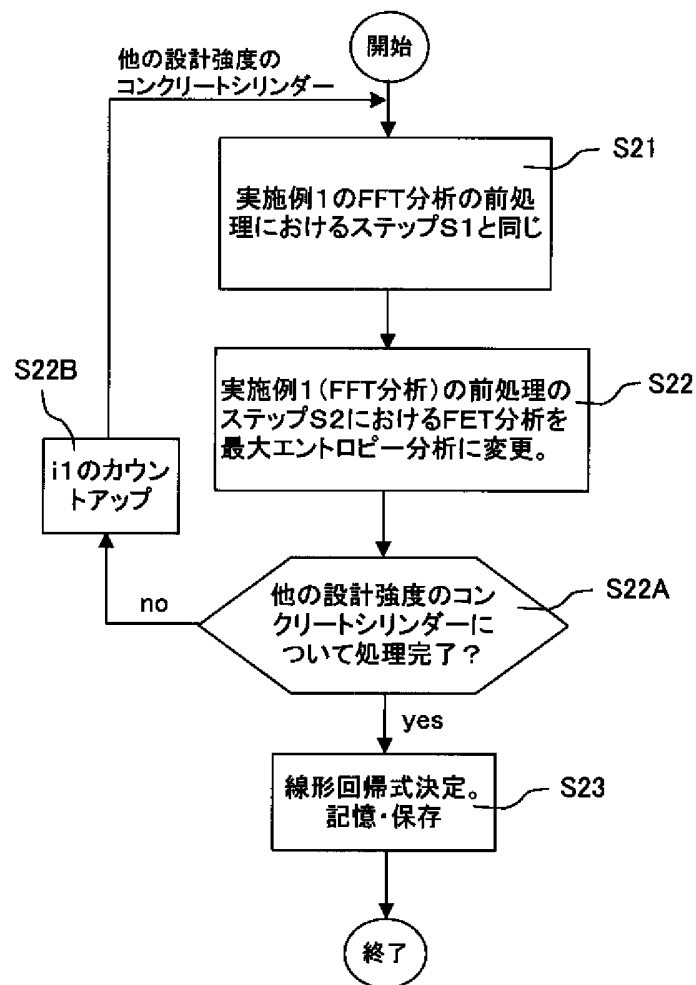
[図43]



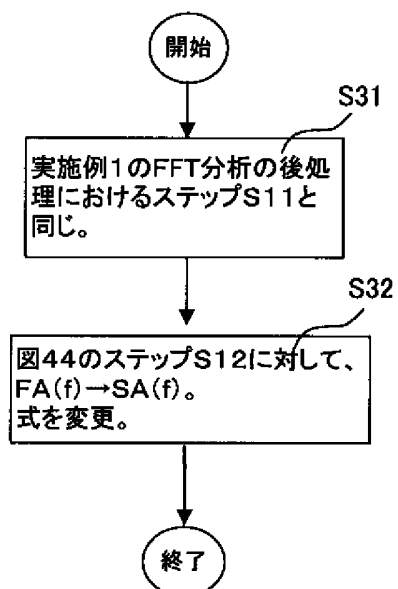
[図44]



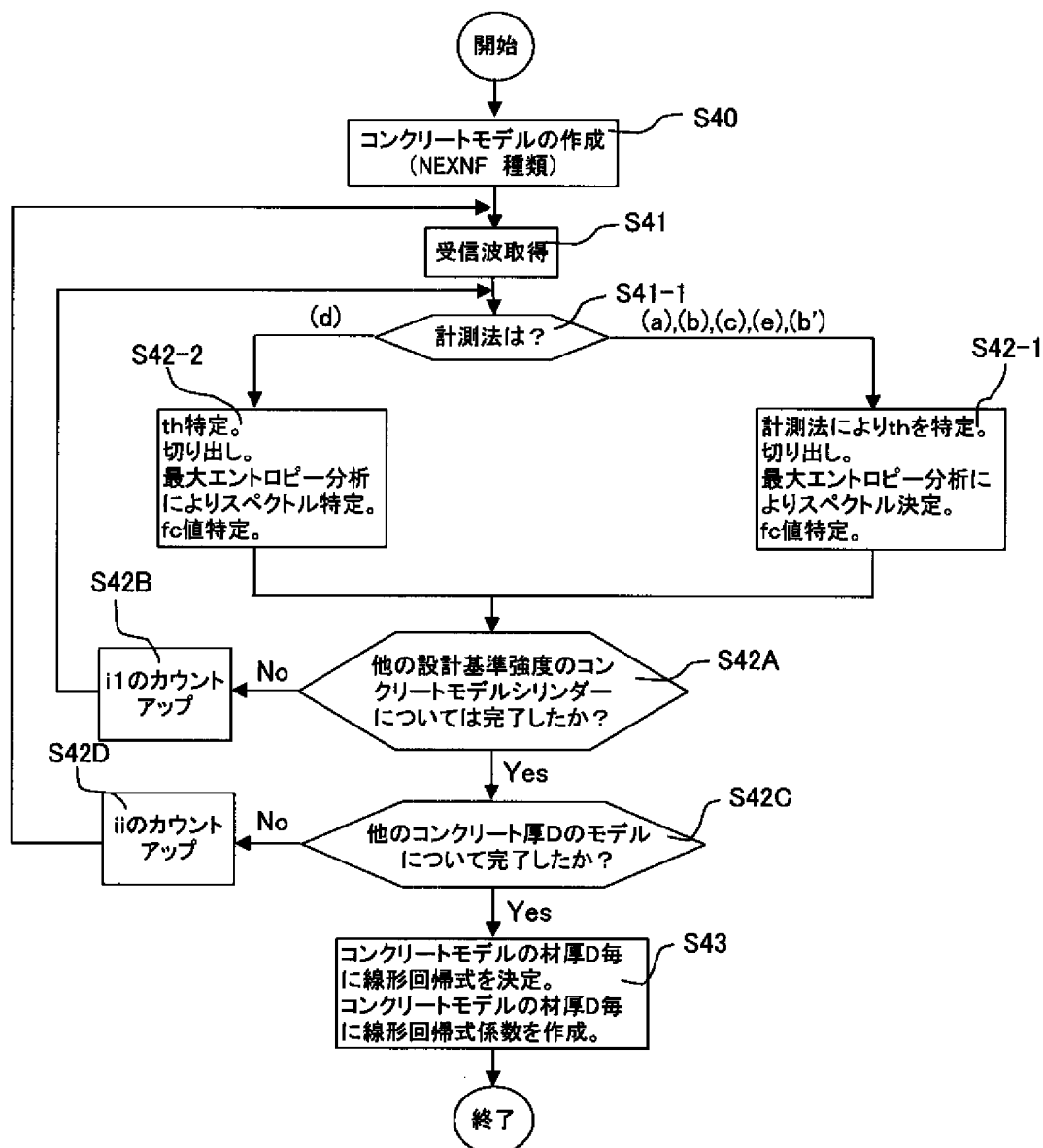
[図45]



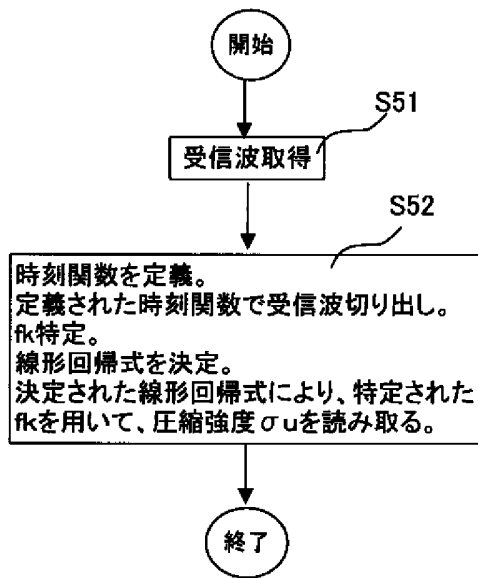
[図46]



[図47]



[図48]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/017240

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl⁷ G01N29/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl⁷ G01N29/00-29/28, G01N33/38, G01N3/00-3/62

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2005

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2005 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2005

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JICST FILE (JOIS)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	Atsushi IMAI et al., "Choonpa Hihakai Shikhenho ni yoru Concrete Asshuku Kyodo no Suitei ni Kansuru Kenkyu", Architectural Institute of Japan 2004 Nendo Taikai (Hokkaido) Gakujutsu Koen Kogaishu A-1 Bunsatsu, 31 July, 2004 (31.07.04), pages 621 to 622	1-7
Y	JP 9-269215 A (H & B System Inc.), 14 October, 1997 (14.10.97), Full text; Figs. 1 to 59 (Family: none)	1-7
Y	JP 2003-149214 A (Yugen Kaisha Yamaguchi TLO), 21 May, 2003 (21.05.03), Full text; Figs. 1 to 10 (Family: none)	1-7

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

09 February, 2005 (09.02.05)

Date of mailing of the international search report

01 March, 2005 (01.03.05)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2004/017240

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2001-116731 A (Nippon Kogyo Kensa Kabushiki Kaisha), 27 April, 2001 (27.04.01), Full text; Figs. 1 to 10 (Family: none)	6

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G01N29/00

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁷ G01N29/00-29/28, G01N33/38, G01N3/00-3/62

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2005年
 日本国登録実用新案公報 1994-2005年
 日本国実用新案登録公報 1996-2005年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

JICSTファイル (JOIS)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	今井敦他, 「超音波非破壊試験法によるコンクリート圧縮強度の推定に関する研究」, 日本建築学会2004年度大会(北海道)学術講演梗概集A-1分冊, 2004. 07. 31, p. 621-622	1-7
Y	JP 9-269215 A (株式会社エッチアンドビーシステム) 1997. 10. 14, 全文, 第1-59図 (ファミリーなし)	1-7
Y	JP 2003-149214 A (有限会社山ロティー・エル・オー) 2003. 05. 21, 全文, 第1-10図 (ファミリーなし)	1-7

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

09. 02. 2005

国際調査報告の発送日

01. 3. 2005

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)
 郵便番号100-8915
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

鈴木 俊光

2W

9115

電話番号 03-3581-1101 内線 3292

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	JP 2001-116731 A (日本工業検査株式会社) 2001.04.27, 全文, 第1-10図 (ファミリーなし)	6