

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5404218号
(P5404218)

(45) 発行日 平成26年1月29日(2014.1.29)

(24) 登録日 平成25年11月8日(2013.11.8)

(51) Int.Cl. F I
GO 1 N 29/04 (2006.01) GO 1 N 29/10 5 0 6
GO 1 N 29/44 (2006.01) GO 1 N 29/22 5 0 4

請求項の数 3 (全 32 頁)

(21) 出願番号	特願2009-158968 (P2009-158968)	(73) 特許権者	000140292
(22) 出願日	平成21年7月3日(2009.7.3)		株式会社奥村組
(65) 公開番号	特開2011-13150 (P2011-13150A)		大阪府大阪市阿倍野区松崎町2丁目2番2号
(43) 公開日	平成23年1月20日(2011.1.20)	(73) 特許権者	506258305
審査請求日	平成24年5月9日(2012.5.9)		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
		(74) 代理人	100067747
			弁理士 永田 良昭
		(74) 代理人	100121603
			弁理士 永田 元昭
		(74) 代理人	100135781
			弁理士 西原 広徳

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 コンクリート構造物のひび割れ状態計測方法およびその装置

(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、受信する受信探触子とを備え、
 両探触子を、コンクリートのひび割れを隔てた両側に配置して、コンクリートのひび割れ状態を計測するコンクリート構造物のひび割れ状態計測装置であって、
 ひび割れを隔てた一側のコンクリート表面より広帯域超音波を発信し、ひび割れを隔てた他側のコンクリート表面で広帯域超音波を受信し、送受信位置をずらして複数回送受信すると共に、
 受信した広帯域受信波からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトルを求める第1演算機能と、
 上記広帯域受信波スペクトルからフィルタを用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトルを求める抽出機能と、
 抽出された狭帯域受信波スペクトルをフーリエ逆変換して時系列波を求める第2演算機能と、
 上記時系列波を時系列重み付け関数で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形を求める第3演算機能と、
 上記処理波形から回折波の起生時刻を讀出す讀出し機能と、
 上記起生時刻に基づいて、ひび割れ状態を演算する第4演算機能と、を備えた制御手段を設け、
 上記制御手段は、

コンクリート構造物表面の水平方向を y 軸とし、コンクリートの深さ方向を x 軸とした時
ひび割れ先端の座標 (x, y) および超音波の音速 v のパラメータ

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ v \end{pmatrix}$$

10

を設定する設定機能と、
設定したパラメータで発信探触子から受信探触子への超音波の伝播時間 F_i を下式で計算する計算機能と、

$$F_i = \frac{\sqrt{(x_{1,i} - x)^2 + (y_{1,i} - y)^2} + \sqrt{(x_{2,i} - x)^2 + (y_{2,i} - y)^2}}{v}$$

上記計算機能で計算された計算値と実測値との残差 d を演算する残差演算機能と、上記残差が許容値以内か否かを判定する収束判定機能と、

上記収束判定機能で残差が許容値以内であると判定された時、最終のパラメータを求めるパラメータ決定機能と、

上記収束判定機能で残差が許容値以内でないとして判定された時、パラメータを以下の (1) ~ (3) の演算により修正するパラメータ修正機能とを備えた
コンクリート構造物のひび割れ状態計測装置。

(1) p をパラメータの修正量とし、 A を偏微分係数からなるヤコビアン行列として、パラメータ修正反復 k 回目のモデルを $p^{(k)}$ で表し、 $F(p)$ をその周りでテイラー展開して

$$F(p) \cong F(p^{(k)}) + A\Delta p$$

30

を得る。ここでヤコビアン行列 A の成分は以下で示される。

$$A_{ij} = \left(\frac{\partial F_i(p)}{\partial p_j} \right)_{p^{(k)}}$$

但し、 $i = 1 \sim N$ 、 $j = 1 \sim M$

(2) ヤコビアン行列 A の計算を行ない $F_i(p)$ の偏微分係数を求める。

40

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial x} = \frac{1}{v} \left\{ \frac{x - x_{1,i}}{\sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2}} + \frac{x - x_{2,i}}{\sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2}} \right\}$$

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial y} = \frac{1}{v} \left\{ \frac{y - y_{1,i}}{\sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2}} + \frac{y - y_{2,i}}{\sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2}} \right\}$$

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial v} = -\frac{1}{v^2} \left\{ \sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2} + \sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2} \right\}$$

10

(3) 下式により残差 d に基づいてハウスホルダ法によるパラメータ修正量 p を計算し、パラメータ p の修正を実行する。

$$\Delta d = d - F(p^{(k)}) = A\Delta p$$

【請求項2】

上記収束判定機能で残差が許容値以上であると判定された時、パラメータを修正する修正機能を備えた

20

請求項1記載のコンクリート構造物のひび割れ状態計測装置。

【請求項3】

超音波を発信する発信探触子と、受信する受信探触子とを備え、
両探触子を、コンクリートのひび割れを隔てた両側に配置して、コンクリートのひび割れ状態を計測するコンクリート構造物のひび割れ状態計測方法であって、

ひび割れを隔てた一側のコンクリート表面より広帯域超音波を発信し、ひび割れを隔てた他側のコンクリート表面で広帯域超音波を受信し、送受信位置をずらして複数回送受信する第1の工程と、

受信した広帯域受信波からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトルを求める第2の工程と、

30

上記広帯域受信波スペクトルからフィルタを用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトルを求める第3の工程と、

抽出された狭帯域受信波スペクトルをフーリエ逆変換して時系列波を求める第4の工程と、

上記時系列波を時系列重み付け関数で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形を求める第5の工程と、

上記処理波形から回折波の起生時刻を読み出す第6の工程と、

上記起生時刻に基づいて、ひび割れ状態を演算する第7の工程と、を備え、

上記第7の工程は、

40

コンクリート構造物表面の水平方向を y 軸とし、コンクリートの深さ方向を x 軸とした時

ひび割れ先端の座標 (x, y) および超音波の音速 v のパラメータ

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ v \end{pmatrix}$$

を設定し、

設定したパラメータで発信探触子から受信探触子への超音波の伝播時間 F_i を下式で計算し、

10

$$F_i = \frac{\sqrt{(x_{1,i} - x)^2 + (y_{1,i} - y)^2} + \sqrt{(x_{2,i} - x)^2 + (y_{2,i} - y)^2}}{v}$$

上記計算された計算値と実測値との残差 d を演算し、上記残差が許容値以内か否かを判定し、

上記残差が許容値以内であると判定された時、最終のパラメータを求め、

上記残差が許容値以内でないと判定された時、パラメータを以下の(1)~(3)の演算により修正する

20

コンクリート構造物のひび割れ状態計測方法。

(1) p をパラメータの修正量とし、 A を偏微分係数からなるヤコビアン行列として、パラメータ修正反復 k 回目のモデルを $p^{(k)}$ で表し、 $F^{(p)}$ をその周りでテイラー展開して

$$F(p) \cong F(p^{(k)}) + A\Delta p$$

を得る。ここでヤコビアン行列 A の成分は以下で示される。

30

$$A_{ij} = \left(\frac{\partial F_i(p)}{\partial p_j} \right)_{p^{(k)}}$$

但し、 $i = 1 \sim N$ 、 $j = 1 \sim M$

(2) ヤコビアン行列 A の計算を行ない $F_i(p)$ の偏微分係数を求める。

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial x} = \frac{1}{v} \left\{ \frac{x - x_{1,i}}{\sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2}} + \frac{x - x_{2,i}}{\sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2}} \right\}$$

40

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial y} = \frac{1}{v} \left\{ \frac{y - y_{1,i}}{\sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2}} + \frac{y - y_{2,i}}{\sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2}} \right\}$$

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial v} = -\frac{1}{v^2} \left\{ \sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2} + \sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2} \right\}$$

(3) 下式により残差 d に基づいてハウスホルダ法によるパラメータ修正量 p を計算

50

し、パラメータ p の修正を実行する。

$$\Delta d = d - F(p^{(k)}) = A\Delta p$$

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

この発明は、超音波の発信探触子と受信探触子とを、コンクリートのひび割れを隔てた両側に配置して、コンクリートのひび割れ状態（ひび割れの深さや傾き等）を計測するようなコンクリート構造物のひび割れ状態計測方法およびその装置に関する。

【背景技術】

【0002】

一般に、橋梁その他のコンクリート構造物において、その施工時より年月が経過すると、該コンクリートには、ひび割れが発生し、その補修に際しては該ひび割れの深さや傾きが判別できると、補修工事に有効となる。

【0003】

20

従来、このようなコンクリート構造物のひび割れ状態を計測する方法、装置としては、特許文献1に開示（特に、同公報の段落[0069]～[0075]参照）されたものがある。

すなわち、コンクリート構造物としてのコンクリート塊におけるひび割れの深さの計測に際し、共振振動数が2.5MHzの発信探触子と受信探触子とを、ひび割れを挟むように配置し、ステップ型電圧を500ボルトとし、発信探触子に該ステップ型電圧を所定時間間隔（例えば、5m秒間隔）で連続して印加する。

【0004】

この時、上記発信探触子および受信探触子をコンクリート塊の表面に接触させながら、所定範囲内で移動させ、入力超音波毎に受信超音波を収録し、複数回の送受信の加算平均を行なった時系列波を求め、この時系列波から、ひび割れの底部を迂回する波（回折波）の起生時刻 t_h を特定し、次の[数1]からひび割れの深さ d_e を求めるものである。

30

【数1】

$$d_e = \frac{1}{2} v \cdot t_h \times 10^{-1} \quad [\text{cm}]$$

但し、 v は超音波のコンクリート内における音速 [mm/μsec]

【0005】

40

しかしながら、この特許文献1に開示された従来技術においては、周波数が2.5MHz（2500kHz）と相対的に高い。このように、周波数が高い場合には、超音波の直進性が大きく、超音波の指向方向における強度の減衰が大となる。一般に、周波数が高くなる程、その減衰が加速度的に大きくなるため、2.5MHzの受信波では、その受信強度が小さくなる問題点があった。

また、2.5MHzを中心とする狭帯域波が使用される関係上、外乱の影響を受けやすい問題点もあった。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

50

【特許文献1】特許第4050470号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

そこで、この発明は、ひび割れを隔てた一側のコンクリート表面より広帯域超音波を発信し、ひび割れを隔てた他側のコンクリート表面で広帯域超音波を受信し、送受信位置をずらして複数回送受信すると共に、受信した広帯域受信波からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトルを求め、このスペクトルからフィルタを用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトルを求め、抽出された狭帯域受信波スペクトルをフーリエ逆変換して時系列波を求め、この時系列波を時系列重み付け関数で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形を求め、この処理波形から回折波の起生時刻を読み出し、該起生時刻に基づいて、ひび割れ状態を演算することにより、外乱に影響されにくく、しかも、広帯域波の成分内には超音波の指向方向における強度の減衰率が小さい成分があり、受信波の強度を十分に確保することができると共に、ひび割れ状態を比較的正確に計測することができるコンクリート構造物のひび割れ状態計測方法およびその装置の提供を目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【0008】

この発明によりコンクリート構造物のひび割れ状態計測装置は、超音波を発信する発信探触子と、受信する受信探触子とを備え、両探触子を、コンクリートのひび割れを隔てた両側に配置して、コンクリートのひび割れ状態を計測するコンクリート構造物のひび割れ状態計測装置であって、ひび割れを隔てた一側のコンクリート表面より広帯域超音波を発信し、ひび割れを隔てた他側のコンクリート表面で広帯域超音波を受信し、送受信位置をずらして複数回送受信すると共に、受信した広帯域受信波からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトルを求める第1演算機能と、上記広帯域受信波スペクトルからフィルタを用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトルを求める抽出機能と、抽出された狭帯域受信波スペクトルをフーリエ逆変換して時系列波を求める第2演算機能と、上記時系列波を時系列重み付け関数で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形を求める第3演算機能と、上記処理波形から回折波の起生時刻を読み出す読み出し機能と、上記起生時刻に基づいて、ひび割れ状態を演算する第4演算機能と、を備えた制御手段を設け、上記制御手段は、コンクリート構造物表面の水平方向をy軸とし、コンクリートの深さ方向をx軸とした時、ひび割れ先端の座標(x, y)および超音波の音速の

20

30

パラメータ

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ v \end{pmatrix}$$

40

を設定する設定機能と、設定したパラメータで発信探触子から受信探触子への超音波の伝播時間 F_i を下式で計算する計算機能と、

$$F_i = \frac{\sqrt{(x_{1,i} - x)^2 + (y_{1,i} - y)^2} + \sqrt{(x_{2,i} - x)^2 + (y_{2,i} - y)^2}}{v}$$

上記計算機能で計算された計算値と実測値との残差 d を演算する残差演算機能と、上記残差が許容値以内か否かを判定する収束判定機能と、上記収束判定機能で残差が許容値以

50

内であると判定された時、最終のパラメータを求めるパラメータ決定機能と、上記収束判定機能で残差が許容値以内でないとして判定された時、パラメータを以下の(1)~(3)の演算により修正するパラメータ修正機能とを備えたものである。

(1) p をパラメータの修正量とし、 A を偏微分係数からなるヤコビアン行列として、パラメータ修正反復 k 回目のモデルを $p^{(k)}$ で表し、 $F(p)$ をその周りでテイラー展開して

$$F(p) \cong F(p^{(k)}) + A\Delta p$$

を得る。ここでヤコビアン行列 A の成分は以下で示される。

$$A_{ij} = \left(\frac{\partial F_i(p)}{\partial p_j} \right)_{p^{(k)}}$$

但し、 $i = 1 \sim N$ 、 $j = 1 \sim M$

(2) ヤコビアン行列 A の計算を行ない $F_i(p)$ の偏微分係数を求める。

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial x} = \frac{1}{v} \left\{ \frac{x - x_{1,i}}{\sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2}} + \frac{x - x_{2,i}}{\sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2}} \right\} \quad 20$$

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial y} = \frac{1}{v} \left\{ \frac{y - y_{1,i}}{\sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2}} + \frac{y - y_{2,i}}{\sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2}} \right\}$$

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial v} = -\frac{1}{v^2} \left\{ \sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2} + \sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2} \right\} \quad 30$$

(3) 下式により残差 d に基づいてハウスホルダ法によるパラメータ修正量 p を計算し、パラメータ p の修正を実行する。

$$\Delta d = d - F(p^{(k)}) = A\Delta p$$

上述の広帯域超音波の周波数帯域は $0 \sim 5.0 \text{ MHz}$ に設定してもよい。また、フィルタで抽出する所定周波数範囲は、コンクリートのひび割れ計測に最も適した $50 \text{ kHz} \sim 120 \text{ kHz}$ の間に中心周波数を有することが望ましい。

【0009】

上記構成によれば、第1演算機能は、受信した広帯域受信波からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトルを求め、抽出機能は、広帯域受信波スペクトルからフィルタを用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトルを求め、第2演算機能は、抽出された狭帯域受信波スペクトルをフーリエ逆変換して時系列波を求め、第3演算機能は、時系列波を時系列重み付け関数で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形を求め、読出し機能は、処理波形から回折波の起生時刻を読出し、第4演算機能は、起生時刻に基づいて、ひび割れ状態を演算する。

【0010】

このように、超音波として広帯域波を用いるので、その成分内には、超音波の指向方向における強度の減衰率が小さい成分(相対的に周波数が低い成分)が存在し、この結果、受信波の強度を十分に確保することができる。

10

20

30

40

50

また、フィルタを用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出するので、コンクリートのひび割れ計測に最も適した周波数範囲を確保することができる。

【 0 0 1 1 】

さらに、時系列波を時系列重み付け関数で切出すので、コンクリート中に存在する鉄筋からの反射波などの外乱を排除することができる。

しかも、エンファシス処理を行なって処理波形を求めるので、回折波の起生時刻の読出しが、正確かつ容易となる。

これらにより、比較的正確に、ひび割れ状態の計測を行なうことができる。

【 0 0 1 2 】

また、上記構成によれば、制御手段の設定機能は、ひび割れ先端の座標 (x , y) および超音波の音速 のパラメータ

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ v \end{pmatrix}$$

を設定し、計算機能は、設定したパラメータで発信探触子から受信探触子への超音波の伝播時間を計算し、残差演算機能は、上記計算機能で計算された計算値と実測値との残差を演算し、収束判定機能は、残差が許容値以内か否かを判定し、パラメータ決定機能は、上記収束判定機能で残差が許容値以内であると判定された時には、最終のパラメータを求める。

【 0 0 1 3 】

このため、ひび割れの傾斜の有無の如何にかかわらず、その先端位置を座標データとして特定することができ、ひび割れの深さ、ひび割れの傾斜角度を計測することができる。

【 0 0 1 4 】

この発明の一実施態様においては、上記収束判定機能で残差が許容値以上であると判定された時、パラメータを修正する修正機能を備えたものである。

上記構成によれば、残差が許容値より大きい時、パラメータを修正するので、残差が小さくなる方向への修正ができ、ひび割れの先端位置をより一層正確に特定することができる。

【 0 0 1 5 】

この発明によるコンクリート構造物のひび割れ状態計測方法は、超音波を発信する発信探触子と、受信する受信探触子とを備え、両探触子を、コンクリートのひび割れを隔てた両側に配置して、コンクリートのひび割れ状態を計測するコンクリート構造物のひび割れ状態計測方法であって、ひび割れを隔てた側のコンクリート表面より広帯域超音波を発信し、ひび割れを隔てた他側のコンクリート表面で広帯域超音波を受信し、送受信位置をずらして複数回送受信する第1の工程と、受信した広帯域受信波からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトルを求める第2の工程と、上記広帯域受信波スペクトルからフィルタを用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトルを求める第3の工程と、抽出された狭帯域受信波スペクトルをフーリエ逆変換して時系列波を求める第4の工程と、上記時系列波を時系列重み付け関数で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形を求める第5の工程と、上記処理波形から回折波の起生時刻を讀出す第6の工程と、上記起生時刻に基づいて、ひび割れ状態を演算する第7の工程と、を備え、上記第7の工程は、コンクリート構造物表面の水平方向を y 軸とし、コンクリートの深さ方向を x 軸とした時、ひび割れ先端の座標 (x , y) および超音波の音速 のパラメータ

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ v \end{pmatrix}$$

を設定し、設定したパラメータで発信探触子から受信探触子への超音波の伝播時間 F_i を下式で計算し、

10

$$F_i = \frac{\sqrt{(x_{1,i} - x)^2 + (y_{1,i} - y)^2} + \sqrt{(x_{2,i} - x)^2 + (y_{2,i} - y)^2}}{v}$$

上記計算された計算値と実測値との残差 d を演算し、上記残差が許容値以内か否かを判定し、上記残差が許容値以内であると判定された時、最終のパラメータを求め、上記残差が許容値以内でないと判定された時、パラメータを以下の(1)~(3)の演算により修正するものである。

(1) p をパラメータの修正量とし、 A を偏微分係数からなるヤコビアン行列として、パラメータ修正反復 k 回目のモデルを $p^{(k)}$ で表し、 $F^{(p)}$ をその周りでテイラー展開して

20

$$F(p) \cong F(p^{(k)}) + A\Delta p$$

を得る。ここでヤコビアン行列 A の成分は以下で示される。

$$A_{ij} = \left(\frac{\partial F_i(p)}{\partial p_j} \right)_{p^{(k)}}$$

30

但し、 $i = 1 \sim N$ 、 $j = 1 \sim M$

(2) ヤコビアン行列 A の計算を行ない $F_i(p)$ の偏微分係数を求める。

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial x} = \frac{1}{v} \left\{ \frac{x - x_{1,i}}{\sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2}} + \frac{x - x_{2,i}}{\sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2}} \right\}$$

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial y} = \frac{1}{v} \left\{ \frac{y - y_{1,i}}{\sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2}} + \frac{y - y_{2,i}}{\sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2}} \right\}$$

40

$$\frac{\partial F_i(p)}{\partial v} = -\frac{1}{v^2} \left\{ \sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2} + \sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2} \right\}$$

(3) 下式により残差 d に基づいてハウスホルダ法によるパラメータ修正量 p を計算し、パラメータ p の修正を実行する。

$$\Delta d = d - F(p^{(k)}) = A\Delta p$$

【0016】

上記構成によれば、第1の工程で、ひび割れを隔てた一側のコンクリート表面より広帯域超音波を発信し、ひび割れを隔てた他側のコンクリート表面で広帯域超音波を受信し、送受信位置をずらして複数回送受信する。

【0017】

第2の工程で、受信した広帯域受信波からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトルを求め、第3の工程で、上記広帯域受信波スペクトルからフィルタを用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトルを求める。

10

第4の工程で、抽出された狭帯域受信波スペクトルをフーリエ逆変換して時系列波を求め、第5の工程で、上記時系列波を時系列重み付け関数で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形を求める。

第6の工程で、上記処理波形から回折波の起生時刻を読み出し、第7の工程で、該起生時刻に基づいて、ひび割れ状態を演算する。

【0018】

このように、超音波として広帯域波を用いるので、その成分内には、超音波の指向方向における強度の減衰率が小さい成分（相対的に周波数が低い成分）が存在し、この結果、受信波の強度を十分に確保することができる。

20

また、フィルタを用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出するので、コンクリートのひび割れ計測に最も適した周波数範囲を確保することができる。

【0019】

さらに、時系列波を時系列重み付け関数で切出すので、コンクリート中に存在する鉄筋からの反射波などの外乱を排除することができる。

しかも、エンファシス処理を行なって処理波形を求めるので、回折波の起生時刻の読み出しが、正確かつ容易となる。

これらにより、比較的正確に、ひび割れ状態の計測を行なうことができる。

【発明の効果】

【0020】

30

この発明によれば、ひび割れを隔てた一側のコンクリート表面より広帯域超音波を発信し、ひび割れを隔てた他側のコンクリート表面で広帯域超音波を受信し、送受信位置をずらして複数回送受信すると共に、受信した広帯域受信波からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトルを求め、このスペクトルからフィルタを用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトルを求め、抽出された狭帯域受信波スペクトルをフーリエ逆変換して時系列波を求め、この時系列波を時系列重み付け関数で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形を求め、この処理波形から回折波の起生時刻を読み出し、該起生時刻に基づいて、ひび割れ状態を演算するので、外乱に影響されにくく、しかも、広帯域波の成分内には超音波の指向方向における強度の減衰率が小さい成分（相対的に周波数が低い成分）があり、受信波の強度を十分に確保できると共に、ひび割れ状態を比較的正確に計測することができる効果がある。

40

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】本発明のコンクリート構造物のひび割れ状態計測装置を示すブロック図

【図2】発信探触子の説明図

【図3】発信探触子のステップ型電圧発生器の説明図

【図4】受信探触子の説明図

【図5】広帯域超音波の説明図

【図6】(a)はひび割れ状態計測時の平面図、(b)は(a)のC1-C1線矢視断面図

50

【図 7】(a) はひび割れ状態計測時の平面図、(b) は(a) の C 2 - C 2 線矢視断面図

【図 8】(a) はひび割れ状態計測時の平面図、(b) は(a) の C 3 - C 3 線矢視断面図

【図 9】実施形態 1 の工程図

【図 10】広帯域受信波の時系列波を示す波形図

【図 11】広帯域受信波スペクトルを示す波形図

【図 12】フィルタで抽出された狭帯域受信波スペクトルの波形図

【図 13】フーリエ逆変換で求めた時系列波の波形図

【図 14】エンファシス処理された処理波形の波形図

【図 15】(a) はひび割れ状態計測時の平面図、(b) は(a) の C 4 - C 4 線矢視断面図、(c) は(b) の模式図

【図 16】実施形態 2 の工程図

【図 17】広帯域受信波の時系列波を示す波形図

【図 18】広帯域受信波スペクトルを示す波形図

【図 19】フィルタで抽出された狭帯域受信波スペクトルの波形図

【図 20】フーリエ逆変換で求めた時系列波の波形図

【図 21】エンファシス処理された処理波形の波形図

【図 22】(a) はひび割れ状態計測時の平面図、(b) は(a) の C 5 - C 5 線矢視断面図

【図 23】(a) はひび割れ状態計測時の平面図、(b) は(a) の C 6 - C 6 線矢視断面図

【図 24】実施形態 3 の工程図

【発明を実施するための形態】

【0022】

[実施形態 1]

この発明の一実施形態を以下図面に基づいて詳述する。

図面はコンクリート構造物のひび割れ状態計測方法およびその装置を示すが、まず、図 1 を参照して、コンクリート構造物のひび割れ状態計測装置の構成について説明する。

【0023】

図 1 において、被探知体として、ひび割れ 29 が発生したコンクリート構造物 30 (以下単にコンクリートと略記する) 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 は広帯域超音波 (例えば 0 ~ 5.0 MHz) を発信するものであり、上述の受信探触子 32 は 0 ~ 5.0 MHz の広帯域超音波を受信するものである。

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コンクリート 30 内に入射する。

【0024】

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 A/D 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。

【0025】

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処理部である。

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。

【0026】

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

10

20

30

40

50

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。

【0027】

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 2 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。

【0028】

ステップ型電圧発生器 46 には、図 3 に示すようにステップ電圧駆動回路 461 とステップ電圧発生回路 462 とが設けられており、ステップ電圧駆動回路 461 で発生するステップ関数型電圧を振動子 47 に印加する。

10

【0029】

広帯域超音波を被探知体としてのコンクリート 30 に入力する都度、受信探触子 32 で受信波を得る。

この受信波は同軸ケーブル 49 を介して、解析装置 34 の増幅回路 35 へ電圧の時間変動データとして送られる。増幅回路 35 へ送られた時間変動データは、フィルタ回路 36 を介して AD 変換回路 37 に達し、この電圧のアナログ量が該 AD 変換回路 37 によりデジタル量に変換され、ゲートアレイ 38 を介して CPU 40 に転送され、電圧デジタル値の時刻歴が表示装置 41 に表示される。

20

【0030】

自動的に、またはキーボードなどの入力装置 42 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 CPU 40 に伝達され、CPU 40 はコントロール回路 44 を介して増幅回路 35 およびフィルタ回路 36 を制御する。

【0031】

図 4 に示すように、受信探触子 32 には所定範囲の特性の振動数における漸減型ハイパスフィルタ回路 50、増幅回路 51 および振動子 52 が内蔵されている。

【0032】

電流供給回路 33 はコントロール回路 44 により制御されて、所定の時間間隔で動作する。

30

これにより、発信探触子 31 に内蔵された振動子 47 (図 2 参照) から、所定の時間間隔で超音波がコンクリート 30 に入射される。

【0033】

受信探触子 32 に内蔵された振動子 52 (図 4 参照) は超音波が入力する都度、コンクリート 30 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 52 に生じる電圧の時間変化が、受信探触子 32 内のフィルタ回路 50 および増幅回路 51 で 1 次処理される。

【0034】

図 1 の増幅回路 35 およびフィルタ回路 36 の制御が終了した段階で、CPU 40 の指示でコントロール回路 44 が動作し、ゲートアレイ 38 に受信波の加算処理を命令する。

40

【0035】

ゲートアレイ 38 は、AD 変換回路 37 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、CPU 40 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 41 にその時刻歴をリアルタイム表示する。

【0036】

フィルタ回路 50、36 および増幅回路 51、35 は受信探触子 32 と解析装置 34 との双方にそれぞれ内蔵されている。受信探触子 32 に内蔵されているハイパスフィルタ回路 50 および増幅回路 51 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 34 に内蔵されている増幅回路 35 とフィルタ回路 36 は、1 次処理された受信波に対し、C

50

PU40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35、フィルタ回路36は省略してもよい。

【0037】

次に、図5を参照してパルス型電圧積荷による超音波と、ステップ関数型電圧積荷による超音波の相違について説明する。

図5(a)は振動子にパルス型電圧(30~500V)を印加した場合のスペクトルを示し、この場合には同図に示すように振動子の厚さ方向共振振動数を中心周波数とする比較的狭帯域のスペクトルをもつ発信超音波を得ることになる(従来技術の狭帯域周波数に相当。)

10

図5(b)は発信探触子31内の振動子47にステップ関数型電圧(30~500V)を印加した場合のスペクトルを示し、この場合には同図に示すように共振振動数はもちろんのこと、これよりも低周波の成分も励起されたスペクトルとなり、この実施形態の広帯域超音波は図5(b)による超音波を意味する。

【0038】

実施形態1は後述する実施形態2、3の前提条件となる構成であって、コンクリート構造物(以下単に、コンクリートと略記する)30に発生したひび割れ29は図6に示すように、垂直なものと、図7に示すように左下方に傾斜するものと、図8に示すように右下方に傾斜するものが存在するが、コンクリート30の表面30bからは、これらのひび割れ29の状態を判別することは不可能である。

20

【0039】

そこで、図6、図7、図8に示すように、探触子31、32の下方にひび割れ29が存在しない場合には、コンクリート底部30aからの反射波1の経路は、ひび割れ29が存在する場合に対して短くなり、探触子31、32の下方にひび割れ29が存在する場合には、ひび割れ29の回折経路により、コンクリート底部30aからの反射波2の経路は、ひび割れ29が存在しない場合に対して長くなることを利用して、ひび割れ29の状態を判別するものである。

【0040】

この実施形態1では、図6、図7、図8に示すように、ひび割れ29を隔てた一方側に、発信探触子31および受信探触子32を配置して、図9の各ステップQ1~Q7での処理を実行した後に、ひび割れ29を隔てた他方側に、発信探触子31および受信探触子32を配置して、図9の各ステップQ1~Q7での処理を実行し、ひび割れ29を隔てた左側と右側とで反射波の起生時刻 t_h (図14参照)に差異があるか否か、また差異がある場合には、左右何れの起生時刻 t_h が長いかを判定することで、ひび割れ29の状態を判別するものである。

30

【0041】

この実施形態1のひび割れ29の状態判別方法を、図9に示す工程図を参照して、以下に詳述する。

ステップQ1で、発信探触子31から0~5.0MHzの広帯域超音波(0~5.0MHzまでの範囲の周波数成分を全て含む超音波)をコンクリート30の表面30bから発信する。

40

【0042】

次に、ステップQ2で、発信探触子31と同じ側の受信探触子32で広帯域超音波(0~5.0MHz)を受信する。(ステップQ1で図6~図8の左側の探触子31から発信した場合には、ステップQ2で図6~図8の左側(同じ側)の探触子32で受信することを意味する)。そして、送受信位置をずらして複数回送受信を行ない、これら複数回分を加算平均した広帯域受信波 r_{e1} (図10参照)を得る。

【0043】

次に、ステップQ3で、図10に示す広帯域受信波 r_{e1} (時系列波)をフーリエ変換して、図11に示すような広帯域受信波スペクトル s_{p1} を求める。

50

【 0 0 4 4 】

次に、ステップQ4で、図11に示す広帯域受信波スペクトルsp1から、コンクリート30のひび割れ29の計測に最も適した50kHz～120kHzの間に中心周波数 f_0 を有するフィルタFIL1により所定周波数範囲のスペクトルを抽出して、図12に示す狭帯域受信波スペクトルsp2を求める。

上記フィルタFIL1は、関数 $B(f)$ ($B(f_0) = 1.0$)で示すことができ、中心周波数を f_0 とし、所定値を f_a とする時、次のように定義することができる。

【 0 0 4 5 】

$f = f_0 - f_a$ で $B(f) = 0.0$

$f = f_0$ で $B(f) = 1.0$

$f = f_0 + f_a$ で $B(f) = 0.0$

$f_0 - f_a < f < f_0$ で $B(f)$ は増加関数

$f_0 < f < f_0 + f_a$ で $B(f)$ は減少関数

この実施形態では、中心周波数が $f_0 = 55.8$ kHzのフィルタFIL1(図11参照)を用いたが、この中心周波数 f_0 の数値はこれに限定されるものではなく、50kHz～120kHzの間に中心周波数 f_0 が存在すれば、他のフィルタであってもよい。

【 0 0 4 6 】

次に、ステップQ5で、図12に示す狭帯域受信波スペクトルsp2をフーリエ逆変換して、図13に示す時系列波TS1を求める。

次に、ステップQ6で、図13に示す時系列波TS1を、同図に示す時系列重み付け関数(いわゆる、重み付けTGC関数)G1で切出すと共に、最小=乗法などによるエンファシス処理を行なって、図14に示す処理波形em1を求める。図13と図14との対比から明らかのように、エンファシス処理された波形は、必要とする特徴部が際立った波形となる。

【 0 0 4 7 】

図14で示したこの処理波形em1は、図1の表示装置41に可視表示される。そこで、次のステップQ7で、図14の処理波形em1から反射波1または2の起生時刻 t_h を読み出す。

【 0 0 4 8 】

このような各ステップQ1～Q7の処理は、一对の探触子31, 32を用いて、ひび割れ29の両側において実行される。この場合、一对の探触子31, 32を、ひび割れ29の一方側に配置して各ステップQ1～Q7の処理を行なった後に、ひび割れ29の他方で各ステップQ1～Q7での処理を行なう。または、ひび割れ29の両側にそれぞれ一对の探触子31, 32を配置し、広帯域超音波の送受信を含む各ステップQ1～Q7での処理をそれぞれ別々に行なってもよく、あるいは、ひび割れ29の両側にそれぞれ一对の探触子31, 32を配置し、一方側と他方側とで各ステップQ1～Q7での処理を並行して行なってもよい。

【 0 0 4 9 】

次に、ステップQ8で、ひび割れ29を隔てた左側と右側との反射波1または2の起生時刻 t_h の差異判定を実行する。

そして、ひび割れ29を隔てた左側と右側とで起生時刻 t_h が等しいか、または略等しい場合には、ステップQ9に移行し、このステップQ9で、ひび割れ29は図6に示すような垂直なものであると認定する。

【 0 0 5 0 】

また、ひび割れ29を隔てた左側の起生時刻 t_h が、右側のそれよりも長い場合には、別のステップQ10に移行し、このステップQ10で、ひび割れ29は図7に示すような左下方に傾斜するものであると認定する。

さらに、ひび割れ29を隔てた右側の起生時刻 t_h が、左側のそれよりも長い場合には、さらに別のステップQ11に移行し、このステップQ11で、ひび割れ29は図8に示すような右下方に傾斜するものであると認定する。

10

20

30

40

50

【 0 0 5 1 】

ここで、上記各ステップ Q 9 , Q 1 0 , Q 1 1 による処理内容は、図 1 で示した表示装置 4 1 に可視表示される。すなわち、これらの各ステップ Q 9 , Q 1 0 , Q 1 1 は判定結果を可視表示する表示手段を構成するものである。また、図 9 に示す工程図の各ステップ Q 1 ~ Q 1 1 はその処理内容に対応する手段を構成する。

このように、上記各ステップ Q 1 ~ Q 1 1 での処理により、コンクリート 3 0 に発生したひび割れ 2 9 の種別（垂直、左下方に傾斜するもの、右下方に傾斜するもの）を容易に判別することができる。

【 0 0 5 2 】

[実施形態 2]

図 1 5 ~ 図 2 1 はコンクリート構造物のひび割れ 2 9 の状態計測方法およびその装置の実施形態 2 を示すが、この実施形態 2 においても、図 1 ~ 図 5 で示した回路装置を用いる。

この場合、図 1 で示した制御手段としての CPU 4 0 は、図 1 5 (a)、(b) に示すように、ひび割れ 2 9 を隔てた一側のコンクリート 3 0 の表面 3 0 b より発信探触子 3 1 から広帯域超音波（0 ~ 5 . 0 M H z の帯域）を発信し、ひび割れ 2 9 を隔てた他側のコンクリート 3 0 表面で受信探触子 3 2 にて広帯域超音波を受信し、送受信位置（pos 1 , pos 2 , pos 3 ）をずらして複数回送受信すると共に、受信した広帯域受信波（図 1 7 参照）からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトル sp 3 （図 1 8 参照）を求める第 1 演算機能（図 1 6 のステップ U 3 参照）と、上記広帯域受信波スペクトル sp 3 （図 1 8 参照）からフィルタ F I L 2 を用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトル sp 4 （図 1 9 参照）を求める抽出機能（ステップ U 4 参照）と、抽出された狭帯域受信波スペクトル sp 4 （図 1 9 参照）をフーリエ逆変換して時系列波（図 2 0 参照）を求める第 2 演算機能（ステップ U 5 参照）と、上記時系列波（図 2 0 参照）を時系列重み付け関数 G 2 で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形 em 2 （図 2 1 参照）を求める第 3 演算機能（ステップ U 6 参照）と、上記処理波形 em 2 （図 2 1 参照）から回折波（図 1 5 参照）の起生時刻 t_h を読出す読出し機能（ステップ U 7 参照）と、上記起生時刻 t_h に基づいて、ひび割れ 2 9 の状態を演算する第 4 演算機能（ステップ U 8 参照）と、を備えている。

【 0 0 5 3 】

図 1 5 に示すように、コンクリート 3 0 には一般に該コンクリート 3 0 の表面 3 0 b から所定の深さ位置（例えば、約 1 0 . 0 c m の深さ位置）に鉄筋 2 8 が等間隔で複数埋設されており、発信探触子 3 1 から広帯域超音波を発信した場合、図 1 5 (b) に示すように、この鉄筋 2 8 による反射波 と、コンクリート底部 3 0 a での反射波 1 と、ひび割れ 2 9 の先端位置で回折される回折波 とが発生する。

【 0 0 5 4 】

ここで、ひび割れ 2 9 の状態を計測する場合、上述の各反射波 1 , は何れも外乱となるので、この外乱の影響を受けないように、外乱を排除して回折波 のみを抽出処理することが要請される。

特に、この実施形態 2 では、図 2 0 に示す時系列波 T S 2 を時系列重み付け関数 G 2 （同図参照）で切出すことにより、コンクリート 3 0 中に存在する鉄筋 2 8 からの反射波つまり外乱を排除するように構成している。

【 0 0 5 5 】

つぎに、図 1 6 に示す工程図を参照して、コンクリート構造物のひび割れ 2 9 の状態計測方法について詳述する。

ステップ U 1 で、ひび割れ 2 9 の図示左側に配置した発信探触子 3 1 から 0 ~ 5 . 0 M H z の広帯域超音波（0 ~ 5 . 0 M H z までの範囲の周波数成分を全て含む超音波）を、コンクリート 3 0 の表面 3 0 b から発信する。

【 0 0 5 6 】

次に、ステップ U 2 で、ひび割れ 2 9 の図示右側に配置した受信探触子 3 2 で広帯域超

10

20

30

40

50

音波（0～5.0MHz）を受信する。そして、送受信位置を図15のポジションpos1からポジションpos2にずらして送受信を行ない、さらにポジションpos2からポジションpos3にずらして送受信を行ない、このような複数回（この場合は、3回）の送受信を行なったものを加算平均した広帯域受信波re2（図17参照）を得る（第1の工程）。なお、送受信回数は3回に限定するものではなく、4回以上の複数回であってもよい。

【0057】

図17において、時刻 t_d で比較的大きい波が確認されるが、この波は本来外乱となる鉄筋28による反射波であり、また時間 $t = 300 \mu\text{sec}$ 前後で、さらに大きい波が確認されるが、この波も本来外乱となるコンクリート底部30aからの反射波1である。

10

次に、ステップU3で、図17に示す広帯域受信波re2（時系列波）をフーリエ変換して、図18に示すような広帯域受信波スペクトルsp3を求める（第2の工程）。

【0058】

次に、ステップU4で、図18に示す広帯域受信波スペクトルsp3から、コンクリート30のひび割れ29の計測に最も適した50kHz～120kHzの間に中心周波数 f_0 を有するフィルタFIL2により所定周波数範囲のスペクトルを抽出し、図19に示す狭帯域受信波スペクトルsp4を求める（第3の工程）。

上記フィルタFIL2は、関数 $B(f)$ （ $B(f_0) = 1.0$ ）で示すことができ、中心周波数を f_0 とし、所定値を f_a とする時、次のように定義することができる。

20

【0059】

$$f = f_0 - f_a \text{ で } B(f) = 0.0$$

$$f = f_0 \text{ で } B(f) = 1.0$$

$$f = f_0 + f_a \text{ で } B(f) = 0.0$$

$$f_0 - f_a < f < f_0 \text{ で } B(f) \text{ は増加関数}$$

$$f_0 < f < f_0 + f_a \text{ で } B(f) \text{ は減少関数}$$

この実施形態では、中心周波数 $f_0 = 52.5 \text{ kHz}$ のフィルタFIL2（図18参照）を用いたが、この中心周波数 f_0 の数値はこれに限定されるものではなく、50kHz～120kHzの間に中心周波数 f_0 が存在すれば、他のフィルタであってもよい。

【0060】

30

次にステップU5で、図19に示す狭帯域受信波スペクトルsp4をフーリエ逆変換して、図20に示す時系列波TS2を求める（第4の工程）。

次にステップU6で、図20に示す時系列波（TS2）を、同図に示す時系列重み付け関数（いわゆる、重み付けTGC関数）G2で切出すと共に、最小＝乗法などによるエンファシス処理を行なって、図21に示す処理波形em2を求める（第5の工程）。図20と図21との対比から明らかなように、エンファシス処理された波形は、必要とする特徴部が際立った波形となる。

【0061】

図21に示したこの処理波形em2は、図1の表示装置41に可視表示される。そこで、次のステップU7で、図21の処理波形em2から回折波の起生時刻 t_h を読み出す（第6の工程）。

40

【0062】

次にステップU8で、上記起生時刻 t_h に基づいて、垂直ひび割れ29の深さdeを演算する（第7の工程）。

上記ひび割れ29の深さdeは次のようにして演算することができる。

【0063】

まず、次の[数2]により発信探触子31からひび割れ29の先端を經由して受信探触子32に至る超音波伝播距離Dの平均値 \bar{D} （なお、 \bar{D} は数式においてDの上に“ ”を付された符号を表す。以下同じ。）（図15(c)参照）を演算する。

【数 2】

$$\overline{D} = t_h \times v$$

ここに、 t_h は回折波 の起生時刻

はコンクリート 30 内での超音波の速度（つまり音速）

一例として、起生時刻 t_h が $171.4 \mu\text{sec}$ 、音速 が 4004.3 m/sec の場合には、平均値 \overline{D} は 68.6 cm となる。

【0064】

上記【数 2】により超音波伝播距離 \overline{D} の平均値 \overline{D} を演算した後、次の【数 3】により、ひび割れ 29 の深さ de を演算する。

【数 3】

$$de = \left\{ \left(\frac{\overline{D}}{2} \right)^2 - \left((a1 - \Phi) / 2 \right)^2 \right\}^{1/2}$$

ここに $a1$ は一対の探触子 31, 32 の中心間距離（図 15 (c) 参照）

は探触子 31, 32 の直径

一例として、中心間距離 $a1$ が 100 mm 、直径 が 15 mm 、平均値 \overline{D} が 68.6 cm の場合には、ひび割れ 29 の深さ de は 34.0 cm となり、コンクリート 30 の供試体（いわゆるコンクリート版）として用いた版厚 = 500 mm 、ひび割れの深さ = 30.0 cm のものに対して、略一致するひび割れの深さ de を演算により求めることができた。

【0065】

このように、図 15 ~ 図 21 で示した実施形態 2 のコンクリート構造物のひび割れ状態計測装置は、超音波を発信する発信探触子 31 と、受信する受信探触子 32 とを備え、両探触子 31, 32 を、コンクリート 30 のひび割れ 29 を隔てた両側に配置して、コンクリート 30 のひび割れ 29 の状態を計測するコンクリート構造物のひび割れ状態計測装置であって、ひび割れ 29 を隔てた一側のコンクリート 30 の表面 30b より広帯域超音波（ $0 \sim 5.0 \text{ MHz}$ ）を発信し、ひび割れ 29 を隔てた他側のコンクリート 30 の表面 30b で広帯域超音波を受信し、送受信位置 $pos1$, $pos2$, $pos3$ をずらして複数回送受信すると共に、受信した広帯域受信波 $re2$ （図 17 参照）（詳しくは、加算平均した広帯域受信波）からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトル $sp3$ （図 18 参照）を求める第 1 演算機能（ステップ U3 参照）と、上記広帯域受信波スペクトル $sp3$ からフィルタ $fil2$ （図 18 参照）を用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトル $sp4$ （図 19 参照）を求める抽出機能（ステップ U4 参照）と、抽出された狭帯域受信波スペクトル $sp4$ をフーリエ逆変換して時系列波 $ts2$ （図 20 参照）を求める第 2 演算機能（ステップ U5 参照）と、上記時系列波 $ts2$ （図 20 参照）を時系列重み付け関数 $G2$ で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形 $em2$ （図 21 参照）を求める第 3 演算機能（ステップ U6 参照）と、上記処理波形 $em2$ （図 21 参照）から回折波 の起生時刻 t_h を読出す読出し機能（ステップ U7 参照）と、上記起生時刻 t_h に基づいて、ひび割れ状態（特に、ひび割れ 29 の深さ de 参照）を演算する第 4 演算機能（ステップ U8 参照）と、を備えた制御手段（CPU 40 参照）を設けたものである。

10

20

30

40

50

【 0 0 6 6 】

ここで上記広帯域超音波の周波数帯域は $0 \sim 5.0 \text{ MHz}$ に設定している。また、フィルタ F I L 2 で抽出する所定周波数範囲は、コンクリート 3 0 のひび割れ 2 9 の計測に最も適した $50 \text{ kHz} \sim 120 \text{ kHz}$ の間に中心周波数を有するように設定している。

【 0 0 6 7 】

この構成によれば、第 1 演算機能 (ステップ U 3) は、受信した広帯域受信波 $r e 2$ (詳しくは、加算平均されたもので、図 1 7 参照) からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトル $s p 3$ (図 1 8 参照) を求め、抽出機能 (ステップ U 4) は、広帯域受信波スペクトル $s p 3$ からフィルタ F I L 2 を用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトル $s p 4$ (図 1 9 参照) を求め、第 2 演算機能 (ステップ U 5) は、抽出された狭帯域受信波スペクトル $s p 4$ をフーリエ逆変換して時系列波 T S 2 (図 2 0 参照) を求め、第 3 演算機能 (ステップ U 6) は、時系列波 T S 2 (図 2 0 参照) を時系列重み付け関数 G 2 で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形 $e m 2$ (図 2 1 参照) を求め、読出し機能 (ステップ U 7) は、処理波形 $e m 2$ (図 2 1 参照) から回折波の起生時刻 t_h を読出し、第 4 演算機能 (ステップ U 8) は、起生時刻 t_h に基づいて、ひび割れ 2 9 の状態 (ひび割れの深さ $d e$ 参照) を演算する。

10

【 0 0 6 8 】

このように、超音波として広帯域波 ($0 \sim 5.0 \text{ MHz}$) を用いるので、その成分内には、超音波の指向方向における強度の減衰率が小さい成分 (相対的に周波数が低い成分) が存在し、この結果、受信波の強度を十分に確保することができる。

20

【 0 0 6 9 】

また、フィルタ F I L 2 を用いて所定周波数範囲 ($50 \text{ kHz} \sim 120 \text{ kHz}$ の間に中心周波数 f_0 を有するコンクリートのひび割れ 2 9 計測に最適な範囲) のスペクトルを抽出 (狭帯域受信波スペクトル $s p 4$ 参照) するので、コンクリート 3 0 のひび割れ 2 9 の計測に最も適した周波数範囲を確保することができる。

さらに、時系列波 T S 2 (図 2 0 参照) を時系列重み付け関数 G 2 で切出すので、コンクリート 3 0 中に存在する鉄筋 2 8 からの反射波 などの外乱を排除することができる。

【 0 0 7 0 】

しかも、エンファシス処理を行なって処理波形 $e m 2$ (図 2 1 参照) を求めるので、この処理波形は特徴部分が際立ったものとなり、この結果、回折波の起生時刻 t_h の読出しが、正確かつ容易となる。

30

これらにより、比較的正確に、ひび割れ状態 (特に、ひび割れ 2 9 の深さ $d e$ 参照) の計測を行なうことができる。

【 0 0 7 1 】

また、図 1 5 ~ 図 2 1 で示した実施形態 2 のコンクリート構造物のひび割れ状態計測方法は、超音波を発信する発信探触子 3 1 と、受信する受信探触子 3 2 とを備え、両探触子 3 1, 3 2 を、コンクリート 3 0 のひび割れ 2 9 を隔てた両側に配置して、コンクリート 3 0 のひび割れ 2 9 の状態を計測するコンクリート構造物のひび割れ状態計測方法であって、ひび割れ 2 9 を隔てた一側のコンクリート 3 0 の表面 3 0 b より広帯域超音波を発信し、ひび割れ 2 9 を隔てた他側のコンクリート 3 0 の表面 3 0 b で広帯域超音波を受信し、送受信位置 $p o s 1, p o s 2, p o s 3$ をずらして複数回送受信する第 1 の工程 (ステップ U 1, U 2 参照) と、受信した広帯域受信波 $r e 2$ (図 1 7 参照) からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトル $s p 3$ (図 1 8 参照) を求める第 2 の工程 (ステップ U 3 参照) と、上記広帯域受信波スペクトル $s p 3$ からフィルタ F I L 2 を用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトル $s p 4$ (図 1 9 参照) を求める第 3 の工程 (ステップ U 4 参照) と、抽出された狭帯域受信波スペクトル $s p 4$ をフーリエ逆変換して時系列波 T S 2 (図 2 0 参照) を求める第 4 の工程 (ステップ U 5 参照) と、上記時系列波 T S 2 (図 2 0 参照) を時系列重み付け関数 G 2 で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形 $e m 2$ (図 2 1 参照) を求める第 5 の工程 (ステップ U 6 参照) と、上記処理波形 $e m 2$ (図 2 1 参照) から回折波の起生時刻 t_h を読出す第 6 の工

40

50

程（ステップU7参照）と、上記起生時刻 t_h に基づいて、ひび割れ状態（ひび割れ29の深さ d_e 参照）を演算する第7の工程（ステップU8参照）と、を備えたものである。

【0072】

この構成によれば、第1の工程（ステップU1, U2参照）で、ひび割れ29を隔てた一側のコンクリート表面30bより0～5.0MHzの広帯域超音波を発信し、ひび割れ29を隔てた他側のコンクリート表面30bで広帯域超音波（0～5.0MHzの範囲の周波数成分を全て含む超音波）を受信し、送受信位置 $pos1$, $pos2$, $pos3$ をずらして複数回送受信する。

【0073】

第2の工程（ステップU3参照）で、受信した広帯域受信波 $re2$ （詳しくは、加算平均されたもので、図17参照）からフーリエ変換にて広帯域受信波スペクトル $sp3$ （図18参照）を求め、第3の工程（ステップU4参照）で、上記広帯域受信波スペクトル $sp3$ から50kHz～120kHzの間に中心周波数 f_0 をもつフィルタ $FIL2$ を用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出して狭帯域受信波スペクトル $sp4$ （図19参照）を求める。

10

【0074】

第4の工程（ステップU5参照）で、抽出された狭帯域受信波スペクトル $sp4$ をフーリエ逆変換して時系列波 $TS2$ （図20参照）を求め、第5の工程（ステップU6参照）で、上記時系列波 $TS2$ （図20参照）を時系列重み付け関数 $G2$ （いわゆる、重み付け TGC 関数）で切出すと共に、エンファシス処理を行なって処理波形 $em2$ （図21参照）を求める。

20

【0075】

第6の工程（ステップU7参照）で、上記処理波形 $em2$ （図21参照）から回折波の起生時刻 t_h を読出し、第7の工程（ステップU8参照）で、該起生時刻 t_h に基づいて、ひび割れ状態（ひび割れ29の深さ d_e 参照）を演算する。

【0076】

このように、超音波として広帯域波を用いるので、その成分内には、超音波の指向方向における強度の減衰率が小さい成分（相対的に周波数が低い成分）が存在し、この結果、受信波の強度を十分に確保することができる。

また、フィルタ $FIL2$ を用いて所定周波数範囲のスペクトルを抽出（狭帯域受信波スペクトル $sp4$ 参照）するので、コンクリート30のひび割れ29の計測に最も適した周波数範囲を確保することができる。

30

【0077】

さらに、時系列波 $TS2$ （図20参照）を時系列重み付け関数 $G2$ （いわゆる、重み付け TGC 関数）で切出すので、コンクリート30中に存在する鉄筋28からの反射波などの外乱を排除することができる。

しかも、エンファシス処理を行なって処理波形 $em2$ （図21参照）を求めるので、回折波の起生時刻 t_h の読出しが、正確かつ容易となる。

【0078】

これらにより、比較的正確に、ひび割れ状態（ひび割れ29の深さ d_e 参照）の計測を行なうことができる。特に、実施形態1でひび割れ29の種別が垂直なものであると判別した後、この実施形態2でその深さ d_e を計測する際に有効となる。

40

【0079】

[実施形態3]

図22～図24はコンクリート構造物のひび割れ状態計測方法およびその装置の実施形態3を示すが、この実施形態3においても、図1～図5で示した回路装置を用いる。

【0080】

図22に示すように、コンクリート30のひび割れ29を隔てた一方側に発信探触子31を配置し、ひび割れ29を隔てた他方側の受信探触子32の位置を $No.1$ ～ $No.5$ へと順次移動させて、ひび割れ29からの回折波の伝播時間を実測し、ポジション pos

50

1, pos 2, pos 3でそれぞれ実測した伝播時間の値を加算平均し、探触子31, 32と回折波の伝播時間(加算平均値)から、最小二乗法により、ひび割れ29の先端位置を求めるものである。

【0081】

図22で示した各探触子31, 32の配置に代えて、図23に示すように、コンクリート30のひび割れ29を隔てた一方側に受信探触子32を配置し、ひび割れ29を隔てた他方側の発信探触子31の位置をNo. 1~No. 5へと順次移動させて、上述同様の処理を行なってもよい。

【0082】

この場合、図1で示した制御手段としての、CPU40は、コンクリート30の表面30bの水平方向をy軸とし、コンクリート30の深さ方向をx軸とした時、ひび割れ29先端の座標(x, y)および超音波の音速(詳しくは、コンクリート中における超音波の音速)のパラメータ

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ v \end{pmatrix}$$

を設定する設定機能(図24のステップJ1参照)と、設定したパラメータpで発信探触子31から受信探触子32への超音波の伝播時間を計算する計算機能(ステップJ2参照)と、上記計算機能(ステップJ2)で計算された計算値と実測値との残差dを演算する残差演算機能(ステップJ3参照)と、上記残差dが許容値以内か否かを判定する収束判定機能(ステップJ4参照)と、上記収束判定機能(ステップJ4)で残差dが許容値以内であると判定された時、最終のパラメータpを求めるパラメータ決定機能(ステップJ5参照)と、上記収束判定機能(ステップJ4)で残差dが許容値以上であると判定された時、パラメータpを修正する修正機能(各ステップJ6, J7, J8から成るルーチンR1参照)と、を兼ねる。

【0083】

つぎに、図24に示す工程図(フローチャート)を参照して、ひび割れ状態計測方法について詳述する。

【0084】

測定(この測定については、先の実施形態2を応用する)によりN個のデータd(詳しくはデータの組)が得られたとする。一方、M個のパラメータp(詳しくはパラメータの組)で記述されるモデルがあり、データdは該モデルの応答で近似できるものとする。このとき、両者d, pの関係は形式的に、次の[数4]で表される。

【数4】

$$d = F(p)$$

上記[数4]においてFは関数であり、この関数Fはパラメータpに関して非線形であるから、上記[数4]から直接、パラメータpを求めることはできない。このため、後述する非線形最小二乗法を適用するものである。

そこで、上記[数4]を線形化するために、まずステップJ1でパラメータpの初期値 $p^{(0)}$ を設定する。

【0085】

この実施形態3のパラメータpは、ひび割れ29の先端の座標(x, y)、コンクリート30内での超音波の音速である。したがって、パラメータpは次の[数5]で示すこ

とができる。

【数 5】

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ v \end{pmatrix}$$

10

【0086】

次に、ステップ J 2 で、設定したパラメータ p での伝播時間を計算する。
すなわち、 i 番目の観測データにおける送信点（発信探触子 3 1 参照）の座標を $(x_{1,i}, y_{1,i})$ とし、受信点（受信探触子 3 2 参照）の座標を $(x_{2,i}, y_{2,i})$ とすると、伝播時間 F_i （いわゆる到達時間）は次の [数 6] で示すことができる。

【0087】

【数 6】

$$F_i = \frac{\sqrt{(x_{1,i} - x)^2 + (y_{1,i} - y)^2} + \sqrt{(x_{2,i} - x)^2 + (y_{2,i} - y)^2}}{v} \quad 20$$

【0088】

次に、ステップ J 3 で、上記計算機能（ステップ J 2 参照）で計算された計算値と、実測値との残差 d （図 2 2（b）、図 2 3（b）参照）を演算する。この場合、図 2 4 で示す各ステップ J 2、J 3、J 4、J 6、J 7、J 8 の処理による反復 k 回目のモデルを $p^{(k)}$ で表し、 $F(p)$ をその周りでテイラー展開すると、次の [数 7] を得ることができる。

【0089】

【数 7】

$$F(p) \cong F(p^{(k)}) + A \Delta p$$

30

ここで、 A は偏微分係数からなるヤコビアン行列で、その成分 A_{ij} は次の [数 8] で示すことができる。

また、 p は後述するパラメータの修正量である。

【0090】

【数 8】

$$A_{ij} = \left(\frac{\partial F_i(p)}{\partial p_j} \right)_{p^{(k)}} \quad 40$$

但し、 $i = 1 \sim N$ 、 $j = 1 \sim M$

なお、上記成分 A_{ij} はパラメータ P_j が応答 $F_i(p)$ にどの程度貢献しているかを示す。

【0091】

上記 [数 4] および [数 7] から次に [数 9] で示す線形方程式を得ることができる。

【数 9】

$$\Delta d = d - F(p^{(k)}) = A\Delta p$$

【0092】

上述のステップ J 3 では、上記 [数 9] により計算値と実測値の残差 d （詳しくは、データとモデル応答値の残差のことで、図 2 2、図 2 3 参照）を計算するものである。

なお、上記線形方程式は、特異値分解法、修正グラムシュミット法、ハウスホルダ法（ヤコビアン行列の計算方法）などにより解くことができるが、この実施形態 3 では、ハウスホルダ法を採用している。

10

【0093】

次にステップ J 4 で、残差 d が許容値以内か否かを判定し、残差 d が許容値以内の場合（YES 判定時）には、次のステップ J 5 に移行し、残差 d が許容値以上の場合（NO 判定時）には、別のステップ J 6 を含むルーチン R 1 に移行するが、この実施形態 3 では、次に [数 10]、[数 11]、[数 12] で示す反復計算の打ち切り条件の何れか 1 つが成立すると、ステップ J 5 に移行するものである。

【数 10】

$$\left[\sum_{i=1}^N (d_i - F_i(p))^2 \right]^{1/2} < \text{打ち切り残差}$$

20

【数 11】

$$\left[\sum_{j=1}^M \Delta p_j^2 \right]^{1/2} < \text{打ち切りパラメータ修正量}$$

【数 12】

30

反復回数=打ち切り回数

【0094】

上述のステップ J 4 で NO 判定されると、ルーチン R 1 に移行して、パラメータ p を修正するが、まず、ステップ J 6 で、ヤコビアン行列 A の計算を行なう。

【0095】

上記 [数 8] および [数 6] より $F_i(p)$ の偏微分係数は、次の [数 13] で示され、これによりヤコビアン行列 A の計算を行なうことができる。

【0096】

40

【数 1 3】

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_i(p)}{\partial x} &= \frac{1}{v} \left\{ \frac{x - x_{1,i}}{\sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2}} + \frac{x - x_{2,i}}{\sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2}} \right\} \\ \frac{\partial F_i(p)}{\partial y} &= \frac{1}{v} \left\{ \frac{y - y_{1,i}}{\sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2}} + \frac{y - y_{2,i}}{\sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2}} \right\} \\ \frac{\partial F_i(p)}{\partial v} &= -\frac{1}{v^2} \left\{ \sqrt{(x - x_{1,i})^2 + (y - y_{1,i})^2} + \sqrt{(x - x_{2,i})^2 + (y - y_{2,i})^2} \right\} \end{aligned} \quad 10$$

【0097】

次にステップ J 7 で、ハウスホルダ法によるパラメータ修正量 p を計算し、次のステップ J 8 で、パラメータ p の修正を実行する。このようにして、パラメータ p が修正されると、この内容はステップ J 2, J 3 での処理に反映される。

一方、上述のステップ J 4 で Y E S 判定されると、ステップ J 5 に移行して、このステップ J 5 で最終のパラメータ p が決定される。

【0098】

【数 1 4】

$$S = \|d - F(p)\|^2$$

上記 [数 1 4] の残差 = 乗和 S が充分小さくなるように最終のパラメータ p が決定されるので、ひび割れ 29 の先端の座標 (x, y) から、ひび割れ 29 の先端の位置を正確に求めることができると共に、コンクリート 30 の表面 30 b におけるひび割れ 29 上端の位置が既知であることから、該ひび割れ 29 の傾斜角度をも求めることができる。

【0099】

なお、ひび割れ 29 の先端座標 (x, y) の初期値は、解析対象領域内にあれば、反復計算により最小 = 乗解に自動的に誘導されるため、この実施形態では便宜的に解析対象領域の中央、あるいは探触子座標の平均位置としている。解析対象領域 (ひび割れ 29 の存在範囲) を手動設定した場合、解析対象領域の中央が初期値となり、自動設定した場合、探触子座標の平均位置が初期値となる。

【0100】

また、コンクリート内 30 での超音波の伝播速度 (いわゆる音速) は、予め分かっている場合には既知数として、ひび割れ 29 の先端座標 (x, y) のみを逆解析パラメータとすることもできる。

【0101】

さらに、求解の安定化にはマルカート法を用いており、パラメータ p の値を大きくすると安定した解が得られるが、多くの反復回数を要し、逆に、パラメータ p の値を小さくすると収束が早まる反面、パラメータ修正量 p が発散する危険性が高まる。通常の解析スケール、伝播速度においては、概ね 1 程度に設定すれば、特に問題はない。

さらに、反復計算の打ち切り条件は、上述の [数 1 0]、[数 1 1]、[数 1 2] の何れか 1 つが成立すれば、反復を打切るとよい。

【0102】

このように、図 2 2 ~ 図 2 4 で示した実施態様 3 においては、制御手段としての、CPU 40 (図 1 参照) は、コンクリート 30 の表面 30 b の水平方向を y 軸とし、コンクリートの深さ方向を x 軸とした時、ひび割れ 29 先端の座標 (x, y) および超音波の音速

10

20

30

40

50

のパラメータ

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ v \end{pmatrix}$$

を設定する設定機能（ステップ J 1 参照）と、
 設定したパラメータ p で発信探触子 3 1 から受信探触子 3 2 への超音波の伝播時間 F_i を
 計算する計算機能（ステップ J 2 参照）と、上記計算機能で計算された計算値と実測値と
 の残差 d を演算する残差演算機能（ステップ J 3 参照）と、上記残差 d が許容値以内
 か否かを判定する収束判定機能（ステップ J 4 参照）と、上記収束判定機能で残差 d が
 許容値以内であればと判定された時、最終のパラメータ p を求めるパラメータ決定機能（
 ステップ J 5 参照）とを備えたものである。

10

【 0 1 0 3 】

上記構成によれば、制御手段としての CPU 4 0 の設定機能（ステップ J 1 ）は、ひび
 割れ 2 9 の先端の座標（x, y）および超音波の音速（但し、コンクリート 3 0 内の
 音速を意味する）のパラメータ

20

$$p = \begin{pmatrix} x \\ y \\ v \end{pmatrix}$$

を設定し、計算機能（ステップ J 2 ）は、設定したパラメータ p で発信探触子 3 1 から受
 信探触子 3 2 への超音波の伝播時間 F_i を計算し、残差演算機能（ステップ J 3 ）は、上
 記計算機能（ステップ J 2 ）で計算された計算値と実測値との残差 d を演算し、収束判
 定機能（ステップ J 4 ）は、残差 d が許容値以内か否かを判定し、パラメータ決定機能
 （ステップ J 5 ）は、上記収束判定機能（ステップ J 4 ）で残差 d が許容値以内である
 と判定された時には、最終のパラメータ p を求める。

30

【 0 1 0 4 】

このため、ひび割れ 2 9 の傾斜の有無の如何にかかわらず、その先端位置を座標（x, y）
 データとして特定することができ、ひび割れ 2 9 の深さ、ひび割れ 2 9 の傾斜角度を
 計測することができる。

また、上記収束判定機能（ステップ J 4 参照）で残差 d が許容値以上の時、パラメー
 タ p を修正（パラメータ修正量 p 参照）する修正機能（ルーチン R 1 参照）を備えたも
 のである。

40

【 0 1 0 5 】

上記構成によれば、残差 d が許容値より大きい時、パラメータ p を修正するので、残
 差 d が小さくなる方向への修正ができ、ひび割れ 2 9 の先端位置をより一層正確に特定
 することができる。

【 0 1 0 6 】

この発明の構成と、上述の実施例との対応において、
 この発明の制御手段は、実施例の CPU 4 0 に対応し、
 以下同様に、

第 1 演算機能は CPU 4 0 制御によるステップ U 3 に対応し、

50

抽出機能は、ステップU 4に対応し、
 第2演算機能は、ステップU 5に対応し、
 第3演算機能は、ステップU 6に対応し、
 読出し機能は、ステップU 7に対応し、
 第4演算機能は、ステップU 8に対応し、
 第1の工程は、ステップU 1, U 2に対応し、
 第2の工程は、ステップU 3に対応し、
 第3の工程は、ステップU 4に対応し、
 第4の工程は、ステップU 5に対応し、
 第5の工程は、ステップU 6に対応し、
 第6の工程は、ステップU 7に対応し、
 第7の工程は、ステップU 8に対応し、
 設定機能は、ステップJ 1に対応し、
 計算機能は、ステップJ 2に対応し、
 残差演算機能は、ステップJ 3に対応し、
 収束判定機能は、ステップJ 4に対応し、
 パラメータ決定機能は、ステップJ 5に対応し、
 修正機能は、ルーチンR 1に対応するも、

この発明は、上述の実施例の構成のみに限定されるものではない。

例えば、図22、図23においては探触子32または31を位置No. 1~No. 5へ
 順次移動させると共に、ポジションpos 1~pos 3に移動させたが、これは位置No.
 . 1~No. 2まででもよく、またはNo. 1~No. 5よりもさらに多い位置を設定し
 てもよく、ポジションpos 1~pos 3についても同様であって、送受信回数や探触子
 の移動位置については上記実施形態に限定されるものではない。

【符号の説明】

【0107】

29...ひび割れ

30...コンクリート

31...発信探触子

32...受信探触子

40...CPU(制御手段)

U1, U2...第1の工程

U3...第2の工程(第1演算機能)

U4...第3の工程(抽出機能)

U5...第4の工程(第2演算機能)

U6...第5の工程(第3演算機能)

U7...第6の工程(読出し機能)

U8...第7の工程(第4演算機能)

J1...設定機能

J2...計算機能

J3...残差演算機能

J4...収束判定機能

J5...パラメータ決定機能

R1...修正機能

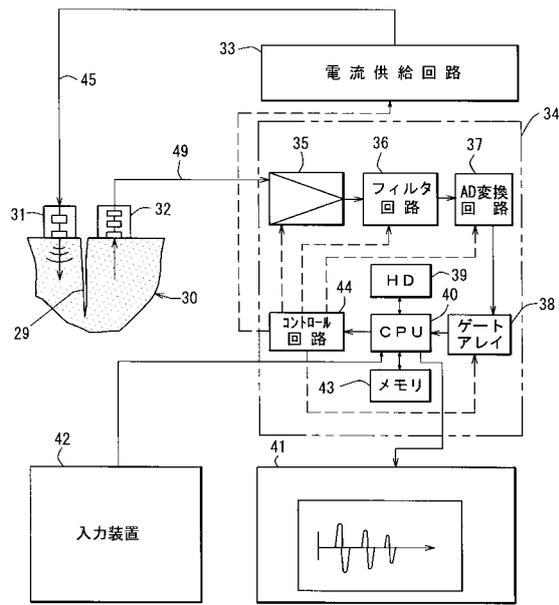
10

20

30

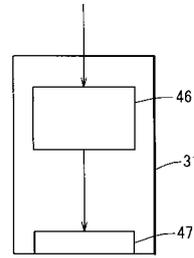
40

【図1】



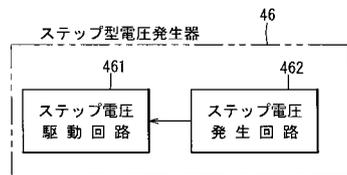
29…ひび割れ
 30…コンクリート
 31…発信探触子
 32…受信探触子
 40…CPU(制御手段)

【図2】

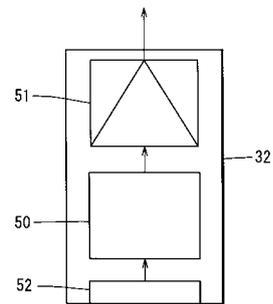


31…発信探触子

【図3】

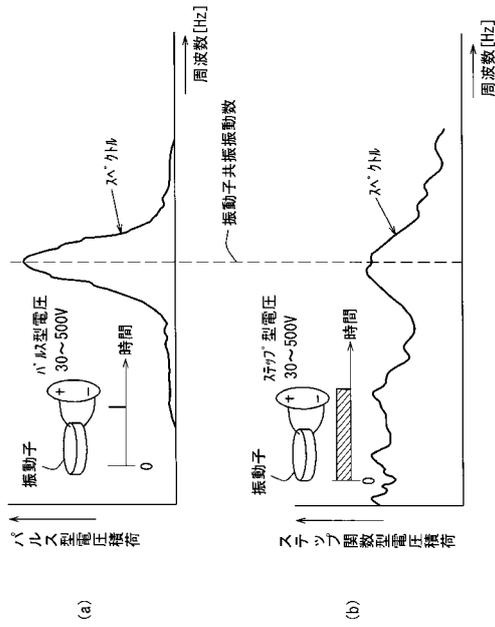


【図4】

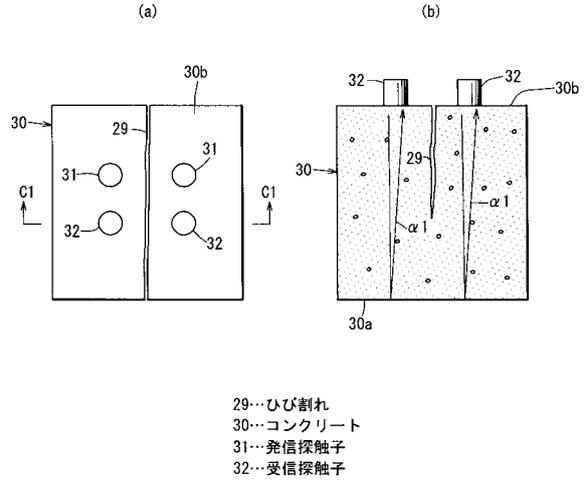


32…受信探触子

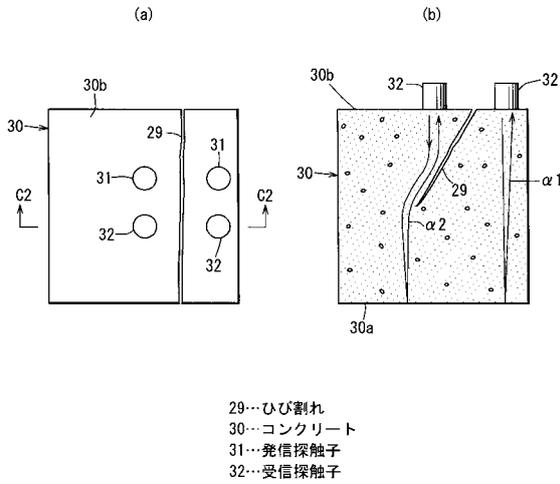
【図5】



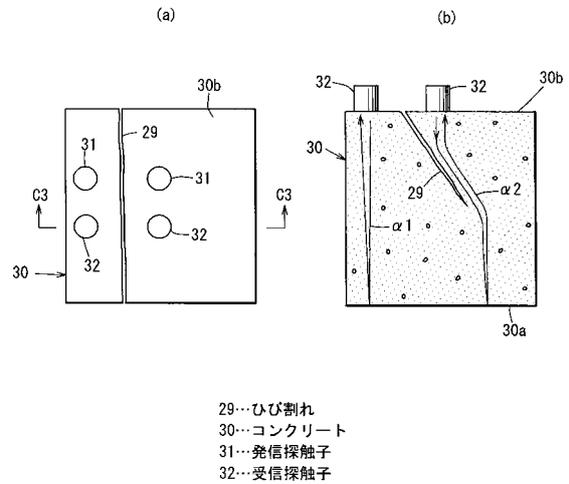
【図6】



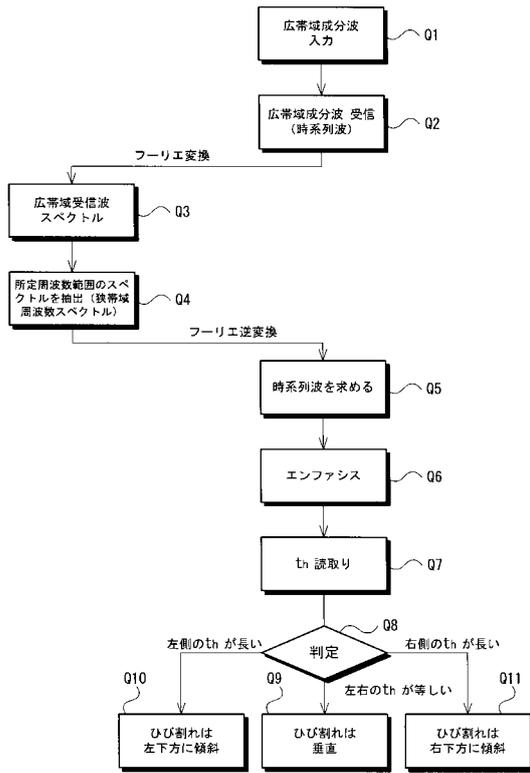
【図7】



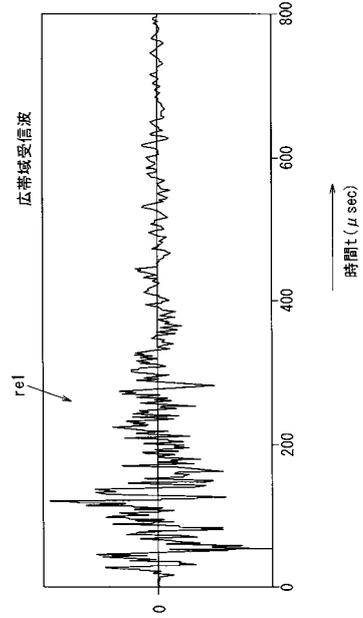
【図8】



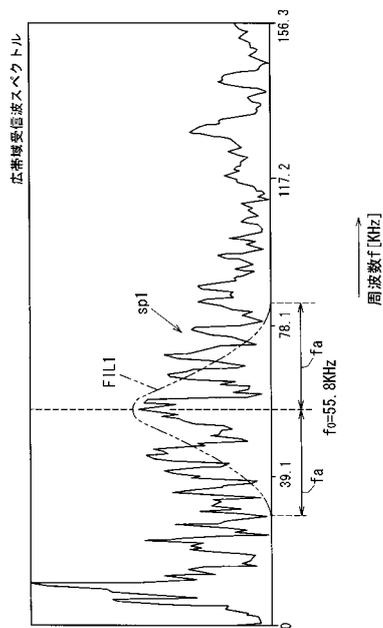
【図9】



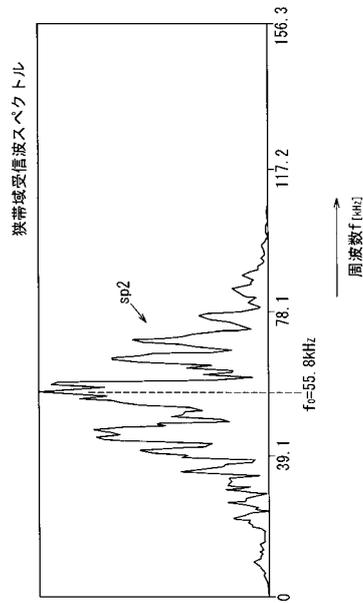
【図10】



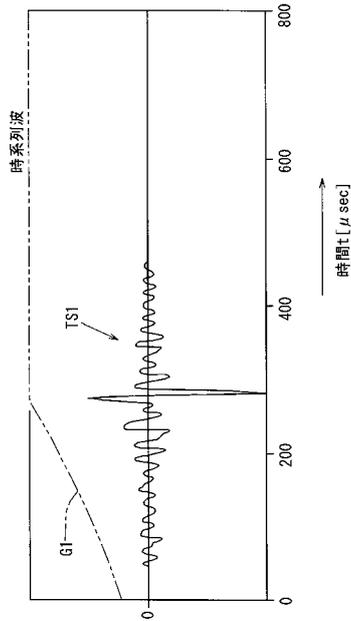
【図11】



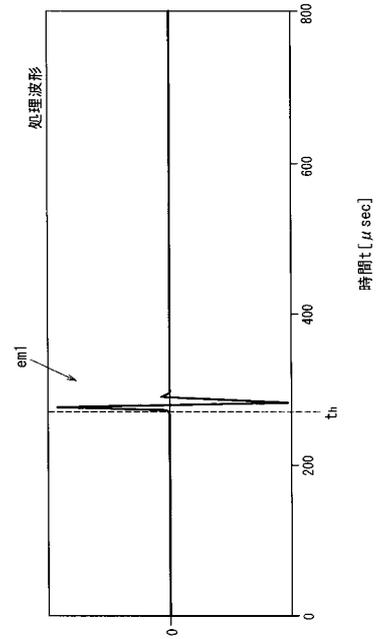
【図12】



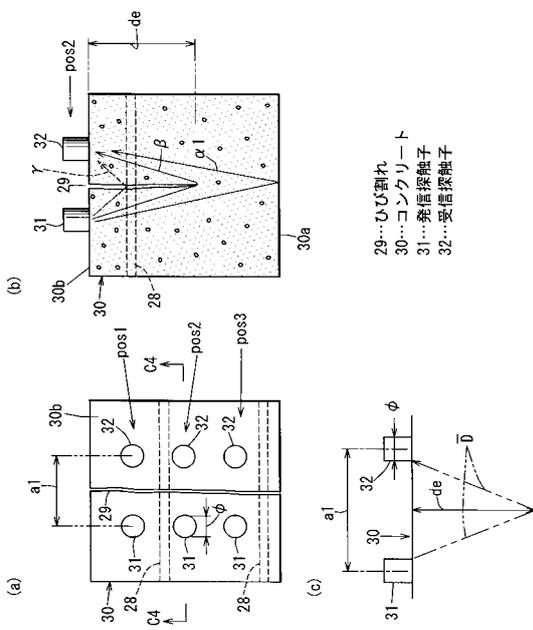
【図13】



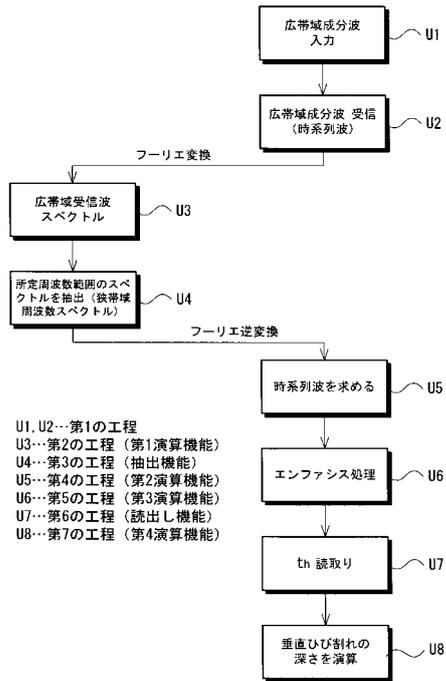
【図14】



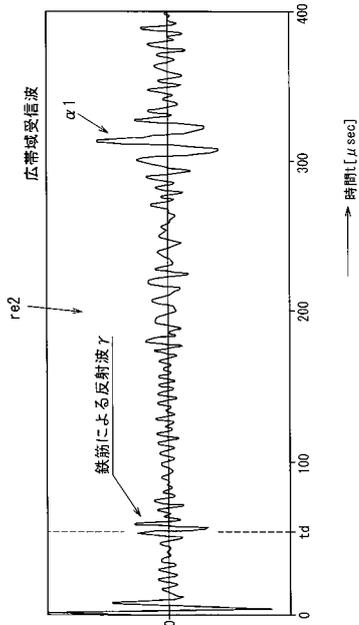
【図15】



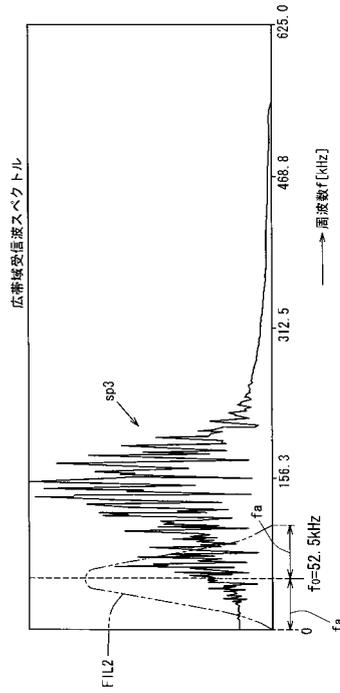
【図16】



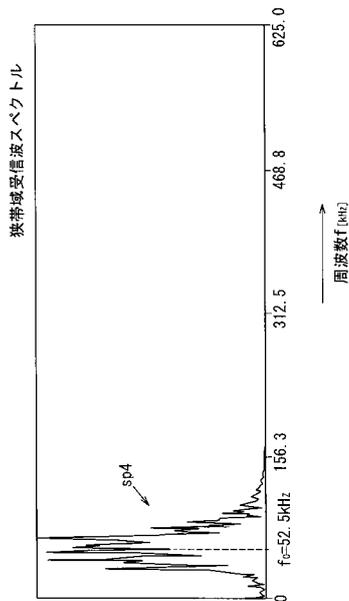
【図17】



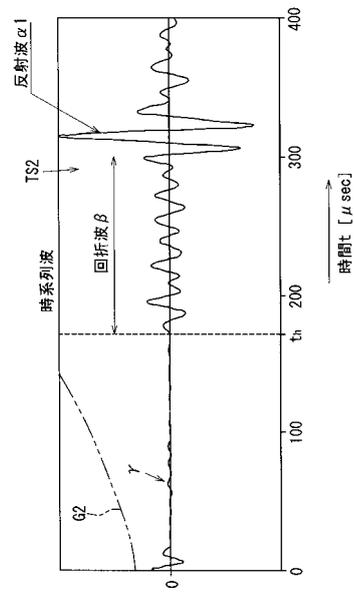
【図18】



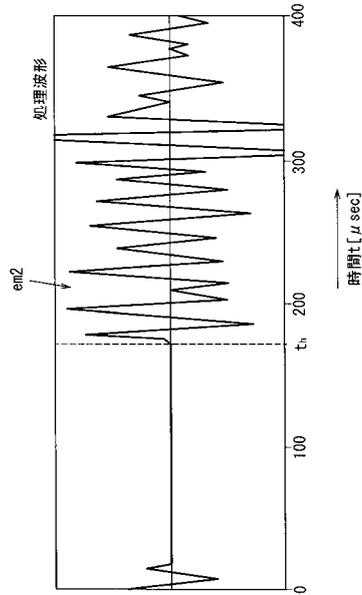
【図19】



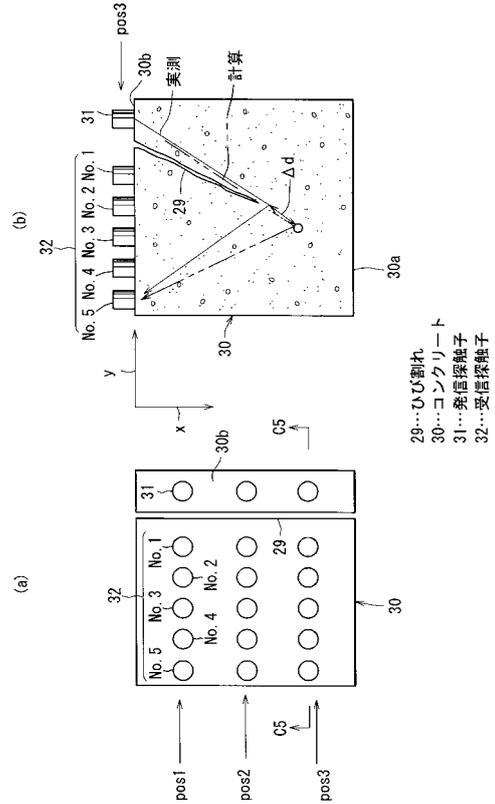
【図20】



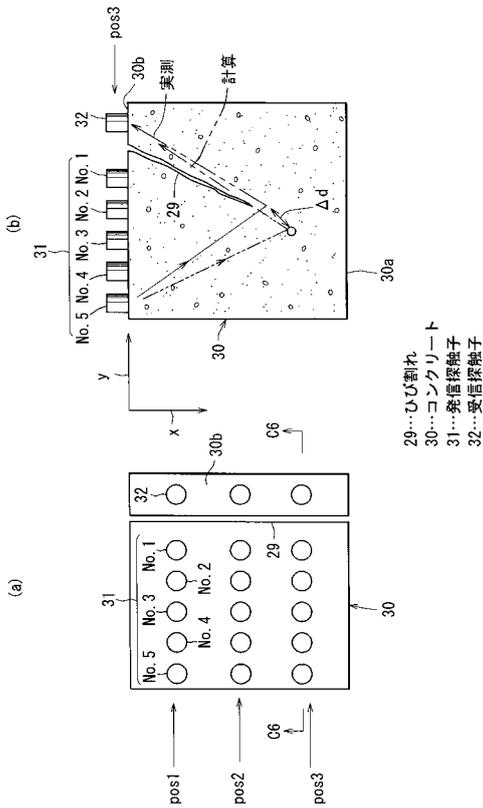
【図21】



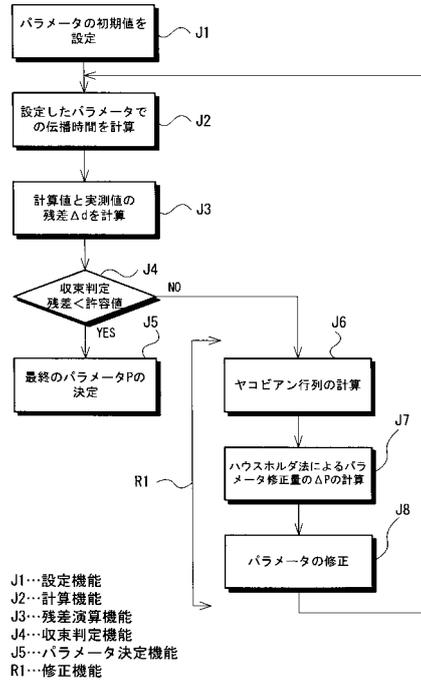
【図22】



【図23】



【図24】



フロントページの続き

- (74)代理人 100141656
弁理士 大田 英司
- (72)発明者 東 邦和
大阪府大阪市阿倍野区松崎町二丁目2番2号 株式会社奥村組内
- (72)発明者 石井 敏之
大阪府大阪市阿倍野区松崎町二丁目2番2号 株式会社奥村組内
- (72)発明者 川口 昇平
大阪府大阪市阿倍野区松崎町二丁目2番2号 株式会社奥村組内
- (72)発明者 清水 智明
大阪府大阪市阿倍野区松崎町二丁目2番2号 株式会社奥村組内
- (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スリユーシ
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 有限会社エッチアンドピースリユーシ
ョン内

審査官 森口 正治

- (56)参考文献 特許第4050470(JP, B2)
特開平08-220074(JP, A)
特開2009-047679(JP, A)
特開2007-205848(JP, A)
特開平08-054378(JP, A)
特許第3713007(JP, B2)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01N29/00-29/52