## (12)公開特許公報(A)

(11)特許出願公開番号

## 特開2014-174040

(P2014-174040A)

(43) 公開日 平成26年9月22日 (2014.9.22)

(51) Int.Cl.			FΙ		テーマコード(参考)
GO1N 2	9/06	(2006.01)	GO1N	29/06	2G047
GO1N 2	9/14	(2006.01)	GO1N	29/14	

## 審査請求 未請求 請求項の数 4 OL (全 22 頁)

(21) 出願番号 (22) 出願日	特願2013-48061 (P2013-48061) 平成25年3月11日 (2013. 3. 11)	(71) 出願人	000235543 飛島建設株式会社 東京都千代田区三番町2番地
		(71) 出願人	509236483 小林 義和
		(71) 出願人	東京都千代田区神田駿河台1-8-14 504132979
			国立大学法人京都大学
			京都府京都市左京区吉田本町36番地1
		(/4)代理人 	100082658 弁理士 伊藤 儀一郎
		(72)発明者	桃木昌平
			東京都千代田区三番町2番地 飛島建設株 ゴークサロ
			ス本社内
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】不均質物性の測定対象物につき行われる弾性波トモグラフィにおける発信点・物性状況(劣化状況)) 同時特定方法

(57)【要約】

(19) 日本国特許庁(JP)

【課題】測定対象物の物性が不均質であったとしても、 トモグラフィ解析に必要な発信位置あるいは時刻の特定 が行え、物性分布状況(劣化状況)の特定も同時に行え る弾性波トモグラフィにおける発信点・物性状況(劣化 状況)同時特定方法を提供することを目的とする。

【解決手段】測定対象物において発する音を受信し、受 信時刻と位置及び音が受信波形計測センサに到達する際 に設定された同一伝播速度の値とにより発信時刻と位置 を推定する数式を用いて推定発信時刻と位置を求め、解 析を行う測定対象物の非破壊検査方法において、対象物 が不均質な物性から構成されてなるときは、検査領域あ るいは適宜分割した小領域で、物性に応じた伝播速度の 値を数式で用いて算出すると共に、推定発信時刻と位置 を求める演算を受信時刻とほぼ同等になるまで繰り返し 行い、音の発信位置および時刻ならびに検査領域あるい は小領域内の物性分布状況を特定することを特徴とする



【選択図】

【特許請求の範囲】

【請求項1】

測定対象物において発せられた音の発信時刻、発信位置及び前記音の受信時刻、受信位置 を用い、発信波形計測センサから受信波形計測センサ間の実際の弾性波伝播時間を算出し

(2)

前記発信波形計測センサから受信波形計測センサ間に複数の分岐点を設けた解析モデルを形成し、該解析モデルから前記発信波形計測センサから受信波形計測センサ間の理論値としての弾性波伝播時間を算出すると共に、求められた理論値としての弾性波伝播時間を 前記実際の弾性波伝播時間に近づける演算を行って、前記分岐点で分岐された分岐線内領域の速度分布を形成し、形成された速度分布により破壊検査を行うトモグラフィ解析を利用した測定対象物の非破壊検査方法であって、

立体状をなす測定対象物内に多面体状検査領域を設け、該多面体状検査領域の頂点を前 記測定対象物表面上に形成すると共に、形成された4点以上の頂点に受信波形計測センサ を設置し、設置した受信波形計測センサにより前記測定対象物において発する音を前記発 信波形計測センサを用いることなく受信し、該受信波形計測センサにより特定された受信 時刻と受信位置及び前記音が複数の受信波形計測センサに到達する際に設定された同一伝 播速度の値とにより発信時刻と発信位置を推定する数式を用いて演算し、前記発した音の 推定発信時刻と推定発信位置を求めてなり、

前記求められた推定発信時刻と推定発信位置の値を用いて前記トモグラフィ解析を行う 測定対象物の非破壊検査方法において、、

前記測定対象物が不均質な物性から構成されてなるときは、前記音が複数の受信波形計測センサに到達する際に設定された同一伝播速度の値ではなく、前記検査領域あるいは検査領域を適宜分割した小領域で、不均質な物性に応じた伝播速度の値を数式で用いて算出すると共に、算出された異なる各伝播速度の値を用いて前記発した音の推定発信時刻と推定発信位置を求める演算を行ってなり、

前記演算を、前記複数の受信波形計測センサにより特定された受信時刻とほぼ同等になるまで繰り返し行い、前記音の発信位置および発信時刻ならびに検査領域あるいは小領域内の物性分布状況を特定する、

ことを特徴とする不均質物性の測定対象物につき行われる弾性波トモグラフィにおける 発信点・物性状況(劣化状況)同時特定方法。

【請求項2】

測定対象物において発せられた音の発信時刻、発信位置及び前記音の受信時刻、受信位置 を用い、発信波形計測センサから受信波形計測センサ間の実際の弾性波伝播時間を算出し

前記発信波形計測センサから受信波形計測センサ間に複数の分岐点を設けた解析モデルを形成し、該解析モデルから前記発信波形計測センサから受信波形計測センサ間の理論値としての弾性波伝播時間を算出すると共に、求められた理論値としての弾性波伝播時間を 前記実際の弾性波伝播時間に近づける演算を行って、前記分岐点で分岐された分岐線内領 域の速度分布を形成し、形成された速度分布により破壊検査を行うトモグラフィ解析を利 用した測定対象物の非破壊検査方法であって、

前記発信波形計測センサを用いることなく、前記測定対象物において発する音を、測定 対象物の表面上に多角形を構成するよう検査領域を設け、少なくとも前記多角形の頂点と なる位置に複数設置された受信波形計測センサにより受信し、該受信波形計測センサによ り特定された受信時刻と受信位置及び前記音が複数の受信波形計測センサに到達する際に 設定された同一伝播速度の値とにより発信時刻と発信位置を推定する数式を用いて演算し 、前記発した音の推定発信時刻と推定発信位置を求めてなり、

前記求められた推定発信時刻と推定発信位置の値を用いて前記トモグラフィ解析を行う 測定対象物の非破壊検査方法において、

前記測定対象物が不均質な物性から構成されてなるときは、前記音が複数の受信波形計 50

10

30

測センサに到達する際に設定された同一伝播速度の値ではなく、前記検査領域あるいは検 査領域を適宜分割した小領域で、不均質な物性に応じた伝播速度の値を数式で用いて算出 すると共に、算出された異なる各伝播速度の値を用いて前記発した音の推定発信時刻と推 定発信位置を求める演算を行ってなり、

前記演算を、前記複数の受信波形計測センサにより特定された受信時刻とほぼ同等になるまで繰り返し行い、前記音の発信位置および発信時刻ならびに検査領域あるいは小領域内の物性分布状況を特定する、

ことを特徴とする不均質物性の測定対象物につき行われる弾性波トモグラフィにおける 発信点・物性状況(劣化状況)同時特定方法。

【請求項3】

前記測定対象物において発する音は、外力負荷により自然的に発生する微小音たるAE 音である、

ことを特徴とする請求項1乃至請求項2のいずれか1項に記載の不均質物性の測定対象 物につき行われる弾性波トモグラフィにおける発信点・物性状況(劣化状況)同時特定方 法。

【請求項4】

前記不均質な物性からなる測定対象物は、交通荷重により自然的に発生するAE音を発信情報として利用できる橋梁床板や高速道路床板である、

20

30

40

10

ことを特徴とする請求項1乃至請求項3のいずれか1項に記載の不均質物性の測定対象物につき行われる弾性波トモグラフィにおける発信点・物性状況(劣化状況)同時特定方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

[0001]

本発明は、物性が均質な構造体などの測定対象物について行われる弾性波を使用したト モグラフィではなく、不均質な物性からなる構造物などの測定対象物について行われる弾 性波トモグラフィにおける、例えばAE音などの発信点および物性分布状況(劣化状況) の同時特定方法に関するものである。

【背景技術】

[0002]

トモグラフィとは、測定対象物における検査領域内の多数の、あるいは多方向の走査線 間における「計測走時」と、解析モデルから算出される「理論走時」との「走時残差」を 許容誤差内に収束させるように、解析モデルの要素パラメータ、例えば弾性波の伝搬速度 を補正し、前記検査領域を補正された各要素の速度の分布図で表す手法を指標するもので ある。

前記の速度の分布図によって測定対象物内部の欠陥等の位置や経年劣化などの程度を、 例えば通常の伝搬速度より遅い低速度の領域として示すことが出来るものとなる。

そして、前記速度の分布図解析は、例えば、複数の弾性波波形観測センサによって検出された弾性波の波形を分析することにより行われている。

【0004】

ここで、当該非破壊検査システムの検査手法の一手段である、いわゆる走査線間の計測 走時の取得は、鋼球等で入力された弾性波の発信波形および受信波形を、それぞれ設置し たセンサ(発信用センサ、受信用センサ)で収録し、読み取られる初動時刻の差から算出 し、解析するものとしていた(特開2011-191202号公報参照)。

[0005]

ところで、前記弾性波の発信手段としては、前述したように、例えば弾性波発信用器具 50

(3)

となる金属製ハンマーなどで打撃するなどの手段が必ず必要とされていると共に、検査の 精度を高めるためには、測定対象物における検査領域内の極力多くの箇所を発信箇所とし て打撃せねばならず、当該発信箇所付近に配置する弾性波波形観測用センサ(発信用セン サ)も打撃箇所数に伴って多数個必要とされ、そしてこの多数の発信用センサを所定の複 数箇所に予め多数設置しておかなければなければならなかった。

[0006]

前記の金属製ハンマーで、例えば高速道路の床面などコンクリート測定対象物所定箇所 に打撃を加える等、強制的な形での発信手段を講じるためには、さらに、常設の足場を構 築して、その足場を利用し、測定対象物所定箇所に作業者が出向き、その上で前記高速道 路の床面などを打撃するなどの発信手段を講じなければならない。

【 0 0 0 7 】

すると作業自体も時間と手間がかかるほか、費用コストも高額となり、特に前述の高架 橋等の高所作業を伴う場合では、作業者の安全面も含めて従来のトモグラフィを利用した 測定対象物の非破壊検査システムは適用しがたいものであった。

 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 8 \end{bmatrix}$ 

すなわち、上記従来のトモグラフィを利用した測定対象物の非破壊検査システムでは、 例えば、金属製ハンマーでの打撃や鋼球等での打撃により、測定対象物の非破壊検査の検 査領域に能動的に弾性波を入力(発信)することが必須であり、ゆえに、観測時にも作業 者が検査領域に近づかなければならないため、足場等設備が必須となる。

【0009】

そして、これは、前記測定対象物の非破壊検査の検査領域を経時的にモニタリングする 場合にも同様で、その都度検査領域に近づかなければならないことになる。また、前述し たように、発信波形を収録するための発信用センサの設置も必須であり、発信点数および 発信位置は予め設置されたセンサ位置となるため、走査線数も限られてしまうとの課題が あったのである。

【0010】

さらに、上記従来のトモグラフィを利用した測定対象物の非破壊検査システムは、前述のとおり走時残差を許容誤差内に収束させる手法を主な検査手法として採用しており、当該手法によれば、発振箇所数及び受信箇所数をなるべく多数設置し、また受信箇所数は発信箇所数とほぼ同数設けることが精度よく劣化等の状況を把握できるもとされていた。 【0011】

このため、受信用センサも発信用センサと同様、多数設置することが求められ、これに より設置コストの大幅上昇は勿論のこと、調査の準備作業に多大な労力と手間を要してい たとの課題があった。

【0012】

これらの課題を解決すべく、発明者らは鋭意創案を重ね、前記測定対象物において発す る音を複数設置された弾性波波形計測センサによって受信し、これにより特定された受信 時刻と受信位置によって、発信時刻と発信位置を推定する数式を用いて演算し、前記発し た音の推定発信時刻と推定発信位置を求め、そして、この求められた推定発信時刻と推定 発信位置の値を用いて前記トモグラフィ解析を行う手法を発明するに至ったのである。 【0013】

しかしながら、前記の手法は、前記測定対象物の物性があくまでも均質に構成されていることが前提とされており、該測定対象物の物性が均質であることにより測定対象物のいかなる箇所にあってもほぼ同様の速度で弾性波が伝播するとのことが前述した解析手法の前提条件とされているのである。

[0014]

しかるに、コンクリート測定対象物などの場合、その物性が均質に構成されていない場合が多く存在する。例えば前記測定対象物の構成材料などに不均質部材が含まれていたり、あるいは測定対象物に使用した材料に経年変化などによる劣化が不均一に生じたり、さらに測定対象物内の一部箇所に空洞やひび割れが生じたりした場合などである。

10

30

[0015]

このような場合においては、前述した測定対象物において発する音を複数設置された弾 性波波形計測センサによって受信し、これにより特定された受信時刻と受信位置によって 、発信時刻と発信位置を推定する数式を用いて演算し、前記発した音の推定発信時刻と推 定発信位置を求め、そして、この求められた推定発信時刻と推定発信位置の値を用いて前 記トモグラフィ解析を行う手法を採用することが出来ないとの課題が存在していた。 【0016】

(5)

なぜなら、前記の様に測定対象物の物性が不均質の場合、前記の手法では、発信時刻と 発信位置を推定する数式を用いて演算を行っても、正確な推定発信時刻と推定発信位置が 求められないとの課題があるからである。

10

【先行技術文献】 【特許文献】 【0017】 【特許文献1】特開2011-191202号公報 【発明の概要】 【発明が解決しようとする課題】 【0018】

かくして、本発明は前記従来の課題を解決するために創案されたものであり、たとえ前 記測定対象物の物性が不均質であったとしても、該不均質物性測定対象物の正確なトモグ <sup>20</sup> ラフィ解析を行うのに必要な、例えばAE音などの「発信位置」あるいは「発信時刻」の 特定が正確に行え、さらには測定対象物の物性分布状況(劣化状況)の特定さえも同時に 行えることとなる不均質物性の測定対象物につき行われる弾性波トモグラフィにおける発 信点・物性状況(劣化状況)同時特定方法を提供することを目的とするものである。

【課題を解決するための手段】

**[**0019**]** 

本発明は、測定対象物において発せられた音の発信時刻、発信位置及び前記音の受信時 刻、受信位置を用い、発信波形計測センサから受信波形計測センサ間の実際の弾性波伝播 時間を算出し、

前記発信波形計測センサから受信波形計測センサ間に複数の分岐点を設けた解析モデルを形成し、該解析モデルから前記発信波形計測センサから受信波形計測センサ間の理論値としての弾性波伝播時間を算出すると共に、求められた理論値としての弾性波伝播時間を 前記実際の弾性波伝播時間に近づける演算を行って、前記分岐点で分岐された分岐線内領 域の速度分布を形成し、形成された速度分布により破壊検査を行うトモグラフィ解析を利 用した測定対象物の非破壊検査方法であって、

立体状をなす測定対象物内に多面体状検査領域を設け、該多面体状検査領域の頂点を前 記測定対象物表面上に形成すると共に、形成された4点以上の頂点に受信波形計測センサ を設置し、設置した受信波形計測センサにより前記測定対象物において発する音を前記発 信波形計測センサを用いることなく受信し、該受信波形計測センサにより特定された受信 時刻と受信位置及び前記音が複数の受信波形計測センサに到達する際に設定された同一伝 播速度の値とにより発信時刻と発信位置を推定する数式を用いて演算し、前記発した音の 推定発信時刻と推定発信位置を求めてなり、

前記求められた推定発信時刻と推定発信位置の値を用いて前記トモグラフィ解析を行う 測定対象物の非破壊検査方法において、

前記測定対象物が不均質な物性から構成されてなるときは、前記音が複数の受信波形計測センサに到達する際に設定された同一伝播速度の値ではなく、前記検査領域あるいは検査領域を適宜分割した小領域で、不均質な物性に応じた伝播速度の値を数式で用いて算出すると共に、算出された異なる各伝播速度の値を用いて前記発した音の推定発信時刻と推定発信位置を求める演算を行ってなり、

30

前記演算を、前記複数の受信波形計測センサにより特定された受信時刻とほぼ同等になるまで繰り返し行い、前記音の発信位置および発信時刻ならびに検査領域あるいは小領域内の物性分布状況を特定する、

ことを特徴とし、

または、

測定対象物において発せられた音の発信時刻、発信位置及び前記音の受信時刻、受信位 置を用い、発信波形計測センサから受信波形計測センサ間の実際の弾性波伝播時間を算出 し、

前記発信波形計測センサから受信波形計測センサ間に複数の分岐点を設けた解析モデルを形成し、該解析モデルから前記発信波形計測センサから受信波形計測センサ間の理論値としての弾性波伝播時間を算出すると共に、求められた理論値としての弾性波伝播時間を 前記実際の弾性波伝播時間に近づける演算を行って、前記分岐点で分岐された分岐線内領域の速度分布を形成し、形成された速度分布により破壊検査を行うトモグラフィ解析を利用した測定対象物の非破壊検査方法であって、

前記発信波形計測センサを用いることなく、前記測定対象物において発する音を、測定対 象物の表面上に多角形を構成するよう検査領域を設け、少なくとも前記多角形の頂点とな る位置に複数設置された受信波形計測センサにより受信し、該受信波形計測センサにより 特定された受信時刻と受信位置及び前記音が複数の受信波形計測センサに到達する際に設 定された同一伝播速度の値とにより発信時刻と発信位置を推定する数式を用いて演算し、 前記発した音の推定発信時刻と推定発信位置を求めてなり、

前記求められた推定発信時刻と推定発信位置の値を用いて前記トモグラフィ解析を行う 測定対象物の非破壊検査方法において、

前記測定対象物が不均質な物性から構成されてなるときは、前記音が複数の受信波形計測センサに到達する際に設定された同一伝播速度の値ではなく、前記検査領域あるいは検査領域を適宜分割した小領域で、不均質な物性に応じた伝播速度の値を数式で用いて算出すると共に、算出された異なる各伝播速度の値を用いて前記発した音の推定発信時刻と推定発信位置を求める演算を行ってなり、

前記演算を、前記複数の受信波形計測センサにより特定された受信時刻とほぼ同等になるまで繰り返し行い、前記音の発信位置および発信時刻ならびに検査領域あるいは小領域内の物性分布状況を特定する、

30

40

10

20

ことを特徴とし、 または、

前記測定対象物において発する音は、外力負荷により自然的に発生する微小音たるAE 音である、

ことを特徴とし、

または、

前記不均質な物性からなる測定対象物は、交通荷重により自然的に発生するAE音を発信情報として利用できる橋梁床板や高速道路床板である、

ことを特徴とするものである。

【発明の効果】

【 0 0 2 0 】

本発明によれば、たとえ前記測定対象物の物性が不均質であったとしても、該不均質物 性測定対象物の正確なトモグラフィ解析を行うのに必要な、例えばAE音などの「発信位 置」あるいは「発信時刻」の特定が正確に行え、さらには測定対象物の物性分布状況(劣 化状況)の特定さえも同時に行えることとなる不均質物性の測定対象物につき行われる弾 性波トモグラフィにおける発信点・物性状況(劣化状況)同時特定方法を提供出来るとの 優れた効果を奏する。

 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}$ 【図1】本発明におけるける第1実施例の構成を説明する説明図である。 【図2】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(1)である。 【図3】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(2)である。 【図4】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(3)である。 【図5】本発明に関連する従来手法の構成を説明する説明図(1)である。 【図6】本発明に関連する従来手法の構成を説明する説明図(2)である。 【図7】本発明に関連する従来手法の構成を説明する説明図(3)である。 【図8】本発明に関連する従来手法の構成を説明する説明図(4)である。 10 【図9】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(4)である。 【図10】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(5)である。 【図11】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(6)である。 【図12】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(7)である。 【図13】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(8)である。 【図14】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(9)である。 【図15】本発明に関連する従来手法の構成を説明する説明図(5)である。 【図16】本発明に関連する従来手法の構成を説明する説明図(6)である。 【図17】本発明に関連する従来手法の構成を説明する説明図(7)である。 【図18】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(10)である。 20 【図19】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(11)である。 【図20】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(12)である。 【図21】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(13)である。 【図22】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(14)である。 【図23】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(15)である。 【図24】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(16)である。 【図25】本発明における第2実施例の構成を説明する説明図(17)である。 【発明を実施するための形態】 以下、本発明を図に示す実施例に基づいて説明する。 30 【実施例】 [0023](第1実施例) 図1に、本発明の第1実施例を示す。ここで、図1は立方体をなす測定対象物1につき 本 発 明 を 適 用 し た も の で 、 立 方 体 を な す 測 定 対 象 物 1 の 内 部 に 多 面 体 状 の 検 査 領 域 2 0 を 形成した例を示すものである。 [0024]この場合、多面体状の検査領域20における4点以上の前記測定対象物1の表面に形成 される頂点に受信波形計測センサ3・・・を設置し、該受信波形計測センサ3・・・によ り前記測定対象物1において発する音を発信波形計測センサ2を用いることなく受信でき 40 るものとしている。 [0025] 図1は、本実施例の基本的構成を示すものであり、立体の測定対象物1に対して、前述 の如く、その表面上に複数の頂点を有する多面体状の検査領域20を想定し、その頂点の 中から4点以上の頂点に対して受信波形計測センサ3・・・を設けてAE波等の受信情報 を計測できるように構成している。 [0026]

ここでは、多面体状の検査領域20を測定対象物1の上側表面に位置する4点と下側表 面に位置する4点とで構成される四角柱(直方体)と想定し、上側表面の4点のみに受信 波形計測センサ3・・・を設置した場合を示している。

なお、多面体状の検査領域20の形状は、その他の形状である多角柱をはじめ、多角錐 50

(7)

であっても、オベリスクのようなものであってもよい。

【 0 0 2 7 】

また、受信波形計測センサ3を設置する箇所については、設置することが可能ならば測 定対象物1の下側表面に設けてもよい。その場合には、上側表面と下側表面とで合計4点 以上となるように、受信波形計測センサ3・・・を設置することになる。 【0028】

(8)

そして、所定の期間、供用状態(通常の使用状態)にある測定対象物1が発するAE波を 計測することにより、受信波形計測センサ3の設置位置におけるAE波の受信時刻や受信 波形等の受信情報を取得する。

【0029】

A E 波の発信源の位置や測定対象物の物性分布状況の特定については、まず、測定対象 物1全体の伝播速度を一般的な物性諸元(例えば、測定対象物がコンクリート構造物であ る場合は、健全な状態で約4,000m/秒)と仮定して、各受信波形計測センサ3・・ ・で取得された受信情報に基づき、AE 波の受信時刻を最もよく説明できる、すなわち、 各受信情報に対して最小誤差となるように、暫定発信源の位置と暫定発信時刻とを逆解析 によって求める。

[0030]

次に、多面体状の検査領域20内を中間節点22・・・を設けて適宜小領域に分割した うえで、各受信情報に対する前記最小誤差をさらに小さくするように、当該小領域ごとの 伝播速度を補正した後、前記暫定発信源から各受信波形計測センサ3の位置までのAE波 の伝播経路(走査線)を複数設定して、前記暫定発信時刻に対する各受信センサ位置での 第一次理論受信時刻を算出する。

【0031】

なお、伝播経路を複数設定する理由は、測定対象物1内に劣化等による欠陥個所では伝 播速度が小さくなるので、当該欠陥個所を通る受信センサ2までの伝播経路に対して算出 した理論受信時刻よりも、欠陥個所を迂回するように設定した伝播経路に対する理論受信 時刻の方が早い可能性に配慮するためである。つまり、実際に計測されるAE波の受信時 刻は、測定対象物1内の状態に関するあらゆる可能性に対して最短理論走時となるように 算出するものであり、解析プログラム上で考慮しておけばよい。この時点では、第一次理 論受信時刻と前記暫定発信時刻との差が、理論走時となる。 【0032】

以下、各受信波形計測センサ3の位置における受信時刻と暫定発信時刻との差を計測走時に相当する値として、理論走時8と計測走時7の相当値との差異を許容誤差内に収まるように、前記逆解析と理論受信時刻の算出を繰り返し行うことで、前記小領域の物性を補正しながら、発信源と測定対象物1の物性分布状況を同時特定することにより、測定対象物1の内部の劣化状況等を把握することができる。

【 0 0 3 3 】

すなわち、本発明では、発信手段は勿論のこと、発信情報を用いることなく、立体形状 をなす測定対象物1に対して、必要最低限の箇所における受信情報の取得のみで、解析上 の工夫によって、測定対象物1の劣化状況等を非破壊で検査できるようにしたことに大き な特徴がある。

【0034】

したがって、本発明によって、検査のための足場構築が不要となり、さらに、検査員に よる高所作業も不要で、安全で合理的な非破壊検査が可能になったことに加えて、今まで 測定対象物1の表面上に多数のセンサを設置しなければ、劣化状況等の把握が困難だった 厚みの大きいコンクリート構造物であっても、内部の劣化の有無等を把握することが可能 になった。

【0035】

以上は、立体をなす多面体状の検査領域20を想定した実施例であるが、具体的な解析 をはじめ、本発明における計測手法の詳細については、本発明に含まれるいわゆる板状の

10

測定対象物1に適用される平面(二次元)解析の場合と同様なので、後述する本発明に係 る第2実施例である板状の測定対象物1に適用する平面(二次元)解析の場合で詳細に説 明することにする。

【0036】

(第2実施例)

図15から理解されるように、従来、弾性波トモグラフィを利用した測定対象物1の非 破壊検査システムにあっては、通常、測定対象物1の既知位置に設置された発信波形計測 センサ2及び受信波形計測センサ3と、前記発信波形計測センサ2の近傍位置で測定対象 物1の表面を打撃して弾性波を発信させ、前記発信波形計測センサ2及び受信波形計測セ ンサ3に受信させる弾性波発信用器具4とを必要とする。

【0037】

そして、前記発信波形計測センサ2では、発信した弾性波の波形を受信して、当該弾性 波の発信時刻と発信位置を特定するものであった。従って、弾性波発信器具4による打撃 は、発信波形計測センサ2の近傍位置であることが必要とされていたのである。

また、前記受信波形計測センサ3では前記弾性波の波形を受信し、その受信時刻と受信 位置とを特定するものである。

【0038】

そして、これら特定された発信時刻、発信位置、受信時刻、受信位置の値を用いて演算し、前記発信波形計測センサ2から受信波形計測センサ3までの距離における実際の弾性 波伝播時間、すなわち、計測走時7を算出するものとしていた(図15、図16、図17 参照)。

【0039】

一方、図18に示す様に発信波形計測センサ2から受信波形計測センサ3間に複数の分 岐点6・・・を設けた解析モデル5を形成し、該解析モデル5より前記発信波形計測セン サ2から受信波形計測センサ3の間の理論値としての弾性波伝播時間、すなわち、理論走 時8を算出するものとしている(図19参照)。

[0040]

そして、求められた理論値としての弾性波伝播時間、すなわち、理論走時8と、前記実際の弾性波伝播時間、すなわち、計測走時7とが等しくなるよう演算を行うのである。 【0041】

この際、前記分岐点6・・・を分岐線11で囲み、分岐線11・・・で囲まれたそれぞ れの分岐線内領域9・・・でのそれぞれの速度分布を算出すると共に、算出されたそれぞ れの分岐線内領域9・・・での速度分布により、例えば、速度が極端に遅い箇所の分岐線 内領域9に速度が遅くなる原因、すなわち欠陥が存在するなどの破壊検査が行えるものと なっていたのである(図19、図20参照)。

【0042】

しかしながら、前述したように、高速道路の床面などについて、従来のトモグラフィ解 析を利用した測定対象物1の非破壊検査システムの適用は困難であり、本発明者らは、前 記高速道路の床面などについて、作業者の弾性波発信行為を必要とせず、例えば高速道路 を走行する車両などにより生じた音(アコースティックエミッション音:AE音)などを 発信情報として捉え、該音(AE音)の発生時刻及び発生位置を算出して、従来の発信時 刻及び発信位置に代替する検査システムを創案するに至ったのである。 【0043】

しかして、図24は、その一実施例を示したものであり、測定対象物1、例えば高速道路の床面の裏面に、複数の受信波形計測センサ3・・・のみ設置してある例(ここでは4つの受信波形計測センサ3を設置)を示している。そして、高速道路を走行する車両により、AE音10が生じたとする例である。

[0044]

なお、 4 つの受信波形計測センサ 3 ・・・で囲まれた領域、すなわち検査領域 2 0 内に は複数の分岐点 6 ・・・が設けられ、これら分岐点 6 ・・・を繋ぐ分岐線 1 1 が形成され

10

10

20

40

て、それぞれの分岐線内領域9・・・が確定される。

【0045】

この例においては、前記AE音10が生じても、その発生時刻及び発生位置は特定でき ない。しかしながら、図24において、例えば、4つの受信波形計測センサ3・・・によ り、前記AE音10の受信時刻及び受信位置は特定できる。よって、特定されたAE音1 0の受信時刻及び受信位置からAE音10の発生時刻(発信時刻)及び発生位置(発信位 置)を推定する数式を用い、該式を用いて演算を行い、前記AE音10の発生時刻(発信 時刻)及び発生位置(発信位置)が推定出来るのである。

【0046】

しかして、この数式としては、たとえば、地震の震源決定法などの数式が用いられる( 図21乃至図23参照)。なお、特定されたAE音10の受信時刻及び受信位置から、発 信情報となるAE音10の発生時刻(発信時刻)及び発生位置(発信位置)を推定出来る 数式であれば、前記地震の震源決定法の数式使用に限定されるものではない。 【0047】

図21乃至図23から理解されるように、いわゆる受信時刻を用いた非線形最小2乗法 による震源決定法によって、図24に示す発信情報となるAE音10の発信時刻及び発信 座標が算出、推定されるものとなる。

すなわち、図 2 3 に示す d t <sup>(m)</sup>が A E 音 1 0 の発信時刻であり、(x s <sup>(m)</sup>、y s <sup>(m)</sup>)が発信座標となる。

【0048】

そして、AE音10の発信時刻であるdt<sup>(m)</sup>、発信位置を示す発信座標 (xs<sup>(m)</sup>)、ys<sup>(m)</sup>)を用い、図17に示す、計測走時7に相当する値を推算し、図19に示す、理論走時8を逆算によって算定するのである。

【0049】

すなわち、これら特定された発信時刻 d t <sup>(m)</sup>、発信位置(x s <sup>(m)</sup>、y s <sup>(m)</sup>)、受信時刻、受信位置の値を用いて演算し、前記 A E 音 1 0 の発信位置から受信波形計 測センサ 3 までの距離における実際の弾性波伝播時間、すなわち、計測走時 7 に相当する 値を推算する(図 1 5、図 1 6、図 1 7 参照)。

【0050】

一方、AE音10(図19では発信点)から受信波形計測センサ3間に複数の分岐点6 30
・・を設けた解析モデル5を形成し、該解析モデルから前記AE音10(図19の発信
点)から受信波形計測センサ3の間の理論値としての弾性波伝播時間、すなわち、理論走時8を算出する(図19参照)。

[0051]

そして、求められた理論値としての弾性波伝播時間、すなわち、理論走時8を前記実際 の弾性波伝播時間、すなわち、計測走時7に相当する値を収束させる演算を行って、前記 分岐点6・・・を分岐線11・・・で繋ぎ、それらの分岐線11・・・で分岐されたそれ ぞれの分岐線内領域9・・・のそれぞれの速度を算出し、もって前記それぞれの分岐線内 領域9・・・における速度分布を形成し、形成された速度分布により、例えば、速度が極 端に遅い箇所の分岐線内領域9に速度が遅くなる原因、すなわち欠陥が存在するなどの破 壊検査が行えるのである(図20参照)。

【 0 0 5 2 】

しかしながら、前記の例はあくまで、測定対象物1の物性が均質である場合を想定した ものであり、コンクリート構造物などの測定対象物1の物性が不均質のものとして構成さ れている場合には、前述した手法によって正確な発信時刻や発信位置が特定できるもので はない。なぜなら、前述の数式で用いられる弾性波の伝播速度については、測定対象物1 の物性が均質で。検査領域20では全て同じ伝播速度であることが前提になっているからで ある。

[0053]

そこで、本件発明者らはさらに新しい発明を創案し、たとえ測定対象物1の物性が不均 50

質な場合、すなわち、例えば前記測定対象物1の構成材料などに不均質部材が多く含まれ ていたり、あるいは測定対象物1に使用した材料に経年変化などによる劣化が不均一に生 じたり、さらに測定対象物分岐線内領域9・・・を1内の一部箇所に空洞やひび割れが生 じたりした場合であっても、例えばAE音10の発生点、換言すれば、発信点、すなわち 発信時刻や発信位置を正確に特定することが出来、もって、測定対象物1の物性が不均質 な場合であっても弾性波によるトモグラフィによる非破壊検査システムが正確に、かつ確 実に運用できる方法を発明するに至ったのである。

[0054]

ここで、本発明の手法を従来法と比較して説明する。

図2から理解されるように、(1)4つの受信波形計測センサ3・・・で囲まれた対象 10 となる領域、すなわち検査領域20内に、複数の分岐点6・・・を設け、これら分岐点6 ・・・を繋ぐ分岐線11を形成して、それぞれの分岐線内領域9・・・を確定する。すな わち、検査領域20を分岐線内領域9・・・(ここでは4つの分岐線内領域9)、すなわち 小領域のセルに分割するのである。

[0055]

そして、各セル、すなわち分岐線内領域9・・・は均質の物性で構成されていると仮定し、それぞれのセル、すなわち分岐線内領域9・・・に弾性波が伝播する伝播速度を同じ 速度として与えておく。

【0056】

複数の分岐点6 ・・・は、いわゆるセルの構成節点になり、検査領域20内において、 <sup>20</sup> 発信点の候補となる点であるが、(2)さらに前記4つの分岐線内領域9内に、複数の中 間節点22 ・・・を分布させておく。

【 0 0 5 7 】

そして、(3)受信点24から全節点6・・・、22・・・までの走査線における伝播時間を、4つの分岐線内領域9・・・(各4つのセル)に与えられた伝播速度と、4つの分岐線内領域9・・・(各4つのセル)を横切る走査線長を基に算出していく。

【0058】

ついで、(4) 各受信時刻より伝播時間を引くことで全節点6・・・、22・・・にお ける推定発信時刻(受信点数分)を求めるのである。

そして、(5)前記求められた推定発信時刻の分散値、すなわち誤差の量が最小となる <sup>30</sup> 節点6・・・。22・・・を発信点と暫定する。これを暫定発信点と仮に名付ける。 【0059】

ついで、図3から理解されるように、(6)前記の暫定発信点から各受信点までの走査 線における伝播時間を算出する(この時、発信時刻は推定発信時刻の平均値を用いる)。 【0060】

さらに、(7)発信時刻と受信時刻から求められる伝播時間(計測走時)と、解析モデ ル5上で4つの分岐線内領域9・・・(4つのセル)に与えられた伝播速度および4つの 分岐線内領域9・・・(4つのセル)を横切る走査線長から求められる伝播時間(理論走 時)が等しくなるように、4つの分岐線内領域9・・・(各4つのセル)に与えられた伝 播速度を補正していく。

【0061】

そして、(8)補正された4つの分岐線内領域9・・・(4つのセル)の伝播速度を基に再度受信点から全節点までの走査線における伝播時間および推定発信時刻を求めていく

【0062】

さらに、前述した(3)乃至(8)の動作を繰り返し行うことにより、局所的な不均質 性が、4つの分岐線内領域9・・・(各4つのセル)で補正される伝播速度によって反映 されながら、正しい発信点が特定されていくのである。

【0063】

以上のように、本発明は、測定対象物1の物性の不均質性を反映した発信点特定(同定 50

)手法であり、また、調査・対象となる領域をセル分割したモデルを使用した発信点特定 (同定)手法であって、『理論走時(解析モデルによる)』が、『計測走時(暫定発信点 と推定発信時刻による)』と等しくなるように各セルの伝播速度を補正し、セル内の伝播 速度が補正されることで、測定対象物1の物性の不均質性を反映した発信点特定(同定) が可能となるのである。さらに、この特定(同定)精度は、中間節点22・・・の分布密 度を高くすることにより任意に調整でき、特定精度の向上が出来るものとなっている。 【0064】

ここで、さらに図を参照して説明する。

まず、図 5 乃至図 8 は、本発明に関連する従来手法による発信点位置同定を説明する説 明図であり、潜在する(目視でわからない)箇所も含め物性が均質な測定対象物 1 と仮定 <sup>10</sup> した場合のモデルでの解析となっている。

【0065】

図 6 に示す様に、実際に得られた 4 つの受信時刻を基に、全ての候補点(図 5 に示すように×印で示す N o . 1 乃至 N o . 4 9 候補点)に対する伝播時間および推定発信時刻を 求めていく。

[0066]

そして、図7に示す様に、発信された1つの信号に対して、4つのセンサで受信していることから、各センサの受信時刻を基に算出された4つの推定発信時刻が等しい(または分散が最小となる)候補点が発信点として特定(同定)される。 【0067】

なお、ここで、分散とは、平均に対してどの程度離れているか、すなわちバラツキの程 度を表す統計量であり、誤差の量とも言える。この例の場合、次式で求められる。 4 つの推定発信時刻の分散:

$$\frac{1}{4} \sum_{i=1}^{4} (t_i - \bar{t})^2$$

[0068]

その結果、

候補点[No.31]が発信点とされる(図 8 参照)。 (ただし、

は4つの推定発信時刻の平均値)

ここで、候補点[No.25]は真の正しい発信点であるが、該候補点[No.25]における 分散:8.437E-09 になっているからである。

【 0 0 6 9 】

しかして、図8に示す様に、測定対象物1の物性を均質として考え、検査領域20内の 伝播速度は全て一定:4、000m/秒としてあるモデルのため、分散、すなわち誤差の量 が最小となる候補点は、真の正しい発信点とはならないのである。

【 0 0 7 0 】

すなわち、前述したように、真の発信点である候補点[No.25]における分散値は8.43 7E-09 であるのに対し、候補点[No.31]における分散値は4.079E-09 となっており、 従来手法では、真の発信点である候補点[No.25]より分散値、すなわち誤差の量が候補 点[No.31]が少なく、その結果、候補点[No.31]が発信点と決定されてしまうのであ る。 20



【0071】

このことは、測定対象物1内に、測定対象物の構成材料などに不均質部材が含まれており、伝播速度が遅くなる箇所があっても従来の均質モデルには反映されず、『時間が掛かる=他のセンサよりも遠かった』と見なされることによるものである。

(13)

そこで、本発明では、測定対象物1の物性がたとえ不均質であったとしても、正確に発 信点を特定(同定)出来るものとした。

【 0 0 7 2 】

本発明による測定対象物1の物性がたとえ不均質であったとしても、正確に発信点を特 定(同定)出来る発信点位置同定につき、図9乃至図14を参照して説明する。

【0073】

10

まず、4つの小領域(セル)に分割した解析モデル5を用いるのは従来と同様である。 そして、各4つのセルには、それぞれ伝播速度を与える。図9では初期値として全てに4 、000m/秒の伝搬速度を与えている。

【0074】

次に、図10に示すように、各セルの伝播速度とセル内を横切る長さから候補点までの 伝播時間を算出する。これも従来法と同様である。

【0075】

さらに、図11に示す様に、この場合において、4つのセルに与えられた初期値が全て 4、000m/秒(均質モデルと同様)であるため、分散値、すなわち誤差の量が最小とな るのは従来手法と同じ候補点[No.31]となってしまっている。

【0076】

しかし、本発明では、図12に示す様に、推定発信時刻の平均、すなわち前述の候補点 [No.31]での推定発信時刻の平均を暫定発信時刻としてまず、暫定発信点を仮に決めて おく。

[0077]

そして、図12に示す4つの各受信点における受信時刻を算出し、実際に得られた受信 時刻との誤差を求めていくのである。

【0078】

そして、図13に示す様に、解析モデル5における暫定発信点を用いた4つの受信点での受信時刻が、実際に得られた受信時刻と等しくなるように、分岐線内領域9(セル)に与えた伝播速度を補正し、補正モデルで再度推定発信時刻を求めていくのである。 【0079】

これにより、図13から理解されるように、ひび割れや劣化が潜在し、物性が不均一と される箇所、すなわち経路2の箇所では、伝播速度が当初の4、000m/秒から2、5 00m/秒及び1、500m/秒と補正されるのである。 【0080】

そして、図14に示す様に、経路2において伝播速度が補正された補正モデルで、再度 計算を行い、その結果、候補点[No.25]における分散値、補正の量が1.00E-10との値 となり、全候補点での最小の分散値、すなわち補正の量とされ、もって、候補点[No.2 5]が真の発信点と認定できるのである。

【0081】

しかして、物性が不均質な測定対象物につき、前記の様に真の発信点が確定できた後は、従来と同様に、該真の発信点における発信時刻及び発信位置並びに受信時刻及び受信位置の値を用いる、すなわち、これら特定された発信時刻dt<sup>(m)</sup>、発信位置(xs<sup>(m)</sup>)、ys<sup>(m)</sup>)、受信時刻、受信位置の値を用いて演算し、前記真の発信位置(候補点 [No.25])から受信波形計測センサ3までの距離における実際の弾性波伝播時間、すな わち、計測走時7を算出する(再度図15、図16、図17参照)。 【0082】

一方、真の発信点(候補点[No.25]:図19では発信点)から受信波形計測センサ3 間に複数の分岐点6・・・を設けた解析モデル5を形成し、該解析モデルから前記真の発

20

30

信点(候補点[No.25]:図19では発信点)から受信波形計測センサ3の間の理論値と しての弾性波伝播時間、すなわち、理論走時8を算出する(図19参照)。 【0083】

そして、求められた理論値としての弾性波伝播時間、すなわち、理論走時8を前記実際 の弾性波伝播時間、すなわち、計測走時7に近づける演算を行って、前記分岐点6・・・ を分岐線11・・・で繋ぎ、それらの分岐線11・・・で分岐されたそれぞれの分岐線内 領域9・・のそれぞれの速度を算出し、もって前記測定対象物1の物性がたとえ不均質 であったとしても前記それぞれの分岐線内領域9・・・における速度分布が正確に形成で き、該正確に形成された速度分布により、例えば、速度が極端に遅い箇所の分岐線内領域 9に速度が遅くなる原因、すなわち欠陥が存在するなどの破壊検査が行えるのである(図 20参照)。

[0084]

このように、逐次補正されるモデルにより、推定発信時刻の分散が最小となる発信点を 求めることで、測定対象物の構成材料などに不均質部材が含まれていた場合、ひび割れや 劣化など局所的な不均質箇所場合などを反映した発信点の位置特定(同定)が可能となる のである。

【0085】

さらに、発信点が増えれば、発信点の数だけ本発明の手法を行うことになり、その結果 、さらに真の発信点の特定(同定)の精度が高くなり、精度の高い弾性波トモグラフィに よる非破壊検査システムを提供できることになる。

[0086]

すなわち、図25に示すように、複数箇所に発生した複数のAE音10・・・を発信情報 として採用して本発明の手法を行うのである。これにより、詳細な測定対象物1の非破壊 検査を行うことも出来る。

【0087】

そして、本発明の主要な装置構成としては、AE音10を受信するAEセンサ(受信 波形計測センサ)、AE音の波形を記録する記録装置、及び表示装置、また真の発信点を 解析する解析装置などが挙げられる。

【 0 0 8 8 】

本発明の方法は、上記の装置を用いて行われ、まず、受信波形計測センサ3・・・を対 30 象となる物性が不均質な測定対象物1の所定箇所へ設置し、地上側の記録装置や表示装置 、解析装置へ有線接続若しくは無線接続し、所定期間、AE音10によるAE波を計測し 、計測したデータは記録装置へ記録する。

[0089]

そして、記録装置により記録された記録(波形時刻歴)を用い、複数設置した受信波形 計測センサ3・・・の各位置関係から、解析装置により真のAE波受信箇所を解析・特定 する。

[0090]

なお、解析・特定は、ひとつのAE音によるAE波を受信する複数のセンサで囲まれた領域 内で得られることが基本とされる。

40

50

ここで得られた真の発信点のコンピュータへの記録は、いわゆる打音検査位置の自動記録にもなる。

【0091】

すなわち、従来、弾性波トモグラフィのための測定対象物1の打音検査では、打音した 位置を点検図に手書きで記録するため手間が掛かっていた。

しかるに、本発明では、この打音検査を実施する領域にセンサを設置して本発明を適用 することにより、打音検査位置が座標データで自動的に記録できるからである。

【0092】

これは通常の打音検査のみならず、打撃や超音波入力を用いて健全性を評価する非破壊 検査手法(リバウンドハンマ法、機械インピーダンス法、衝撃弾性波法、超音波法など)

10

の検査位置も自動的に記録できるとのメリットがある。

【符号の説明】

- 【 0 0 9 3 】
- 1 測定対象物
- 2 発信波形計測センサ
- 3 受信波形計測センサ
- 4 弾性波発信用器具
- 5 解析モデル
- 6 分岐点
- 7 計測走時
- 8 理論走時
- 9 分岐線内領域
- 10 AE音
- 2.0 検査領域
- 2 2 中間節点

3(受信波計測センサ

暫定発信源

3(受信波計測センサ)

22(中間接点)

発信源

3(受信波計測センサ) 1(測定対象物)

-20(検査領域)

3(受信波計測センサ)







(16)





【図6】



JP 2014-174040 A 2014.9.22







【図10】 0.424 m /4,000 m/秒 +0.424 m /4,000 m/秒 (0.000212秒) 経路② 0.424 m /4,000 m/秒 +0.424 m /4,000 m/秒 (0.000212秒) 受信時刻④ 0.005212秒 受信時刻(2) 0.005424秒 各セルの伝播速度とセル内を横切る長さから候補点 までの伝播時間を算出する。 k 後期の +0.424 m /4,000 m/秒 (0.000212秒) +0.424 m /4,000 m/秒 (0.000212秒) 0.424 m /4,000 m/40 0.424 m /4,000 m/秒 候補点[No. 25] ć ③路撃 御路回 × 受信時刻① 0.005212秒 受信時刻③ 0.005212秒 受信時刻② 0.005424秒 受信時刻④ 0.005212秒 本発明による発信点位置同定(例)-2-経路④ 0.849 m 4,000 m/秒 (0.000212秒) 経路② 0.849 m 2,000 m/秒 (0.000424秒) 発信点 時刻:0.005秒 経路① 0.849 m 4,000 m/秒 (0.000212秒) 経路③ 0.849 m 4,000 m/秒 (0.000212秒) ● 受信時刻① 0.005212秒 受信時刻③ 0.005212秒







JP 2014-174040 A 2014.9.22

受信誤差①: -0.000059秒

受信時刻① 0.005271秒

推定発信時刻の平均を暫定発信時刻として、各受信 点における受信時刻を算出し、実際に得られた受信 時刻との誤差を求める。

(18)

【図15】

(19)

【図16】





【図17】











## 【図25】



フロントページの続き

- (72)発明者 小林 義和 東京都豊島区目白五丁目17番
- (72) 発明者 塩谷 智基 京都府京都市西京区吉田本町36番地1 国立大学法人京都大学内
- Fターム(参考) 2G047 AA08 AB05 BA01 BA05 BC02 BC10 BC11 CA03 CA07 FA02

GG47