

明 細 書

発明の名称：地盤調査方法

技術分野

[0001] 本出願は、２００９年１１月１２日に出願された日本国特許出願第２００９－２５２９２号に基づく優先権を主張する。当該出願のすべての内容はこの明細書中に参照により援用されている。

[0002] 本発明は、弾性波（音響波を含む）を用いて地盤を非破壊で可視化して調査する地盤調査方法に係り、特にコンクリート構造物や岩盤を含む地盤内部の構造や局所的なゆるみ、空洞、礫の存在などを一度に広範囲に可視化する方法に関する。

背景技術

[0003] 弾性波（例えば音響波）を用いて地盤を非破壊で可視化して調査する方法に、弾性波トモグラフィと呼ばれる手法がある。弾性波トモグラフィは、弾性波を発生させる手段と弾性波を伝播させるレイアウトによりその方式が分類される。弾性波を発生させる手段から大別すると、発破、機械的に弾性波を発生させる発信機、そして piezo 効果や磁歪効果を用いた圧電セラミックスや磁歪材を用いて弾性波を発生させる発信機に分類される。レイアウトから大別すると、地表から発破などを用いる反射法や屈折法、ボーリング孔を用いた孔井間トモグラフィ法がある。

[0004] 孔井間トモグラフィには、例えば特許文献１に示す手法がある。これによれば、弾性波速度だけではなく地盤中の固有減衰（粘性減衰と称す）を用いた調査を行うことにより、基礎構造物の設計における地盤調査や地中障害物の調査などに適用することが可能である。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献１：特開平１０－６８７７９号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] しかしながら、特許文献 1 において扱う粘性減衰は、Biot の理論に基づくものであり、水で飽和した状態の地盤において弾性波の伝播の際の土粒子とその周囲にある水との摩擦により生じる減衰だけを対象としている（図 4（A）参照）。これに対して、実際の地盤では粘性減衰だけではなく反射や透過を含んだ状態で減衰が生じている。つまり、実際の地盤の減衰と粘性減衰とでは差があり、実際の地盤による減衰から粘性減衰だけを抜き取って問題とすることに困難があった。このため、地盤の状態を精度よく判定することができないおそれや、ともすれば間違った解釈をするおそれがあった。

[0007] 本発明は、前記問題点を解決するべくなされたもので、地盤の状態を精度よく判定して地盤の誤った解釈を回避することが可能な地盤調査方法の提供を目的とする。

課題を解決するための手段

[0008] 本願の請求項 1 に係る発明は、弾性波を用いて地盤を非破壊で可視化して調査する地盤調査方法において、前記地盤の既知の位置に受信機と前記弾性波を発信する発信機とを配置し、該発信機から前記弾性波を発信させ、該発信機から前記受信機に向かう前記地盤中の経路を伝播してきた前記弾性波を該受信機で受信し、該伝播してきた該弾性波の減衰率と速度とを求めて、該減衰率と速度のそれぞれに対して 1 つ以上の減衰率閾値と速度閾値とを設け、該減衰率閾値と速度閾値に対する該減衰率及び速度の比較により前記地盤の状態を判定することとしたものである。

[0009] 本願の請求項 2 に係る発明は、前記地盤の状態を、前記速度に対する前記速度閾値との比較により、砂、シルト、若しくは粘性土の前記地盤の主成分の粒度の違いについて主に判定し、更に、前記減衰率に対する前記減衰率閾値との比較により、気泡若しくは礫を含む状態から前記地盤の締まった状態までの前記地盤の飽和状態の違いについて主に判定することとしたものである。

[0010] 本願の請求項 3 に係る発明は、前記地盤の状態を、砂、ゆるい砂、若しく

は砂礫の状態と、硬い粘性土若しくは締まった砂の状態と、気泡を含む粘性土若しくは気泡を含む砂の状態と、ゆるい粘性土若しくは粘性土の状態と、に判定することとしたものである。

[0011] 本願の請求項 4 に係る発明は、前記地盤がコンクリート又は岩盤であり、前記速度閾値により該地盤の亀裂の有無を判定し、前記減衰率閾値により該亀裂の間に存在する地盤構成媒体を判定することとしたものである。

[0012] 本願の請求項 5 に係る発明は、前記弾性波を擬似ランダム信号で変調された単一のキャリア周波数に基づくようにしたものである。

[0013] 本願の請求項 6 に係る発明は、前記擬似ランダム信号と前記受信された弾性波との相関演算を行うことで、前記減衰率と速度とを求めるようにしたものである。

[0014] 本願の請求項 7 に係る発明は、前記発信機と受信機をすべて前記地盤の内部に配置するようにしたものである。

発明の効果

[0015] 本発明によれば、地盤の状態を精度よく判定して地盤の誤った解釈を回避することが可能となる。具体的には以下のようなことが可能となる。

[0016] 実際の地盤による弾性波の減衰を求めて、それを地盤の状態の判定に用いるので、地盤中の弾性波の速度と組み合わせることで、地盤の状態を正確に判定できる。

[0017] また、擬似ランダム信号を用いた場合には、キャリア周波数に高い周波数を用いても弾性波を遠距離伝播させることができ、結果として精度の高い計測と、暗騒音の影響を受けない計測が可能となる。

図面の簡単な説明

[0018] [図1] 本発明の第 1 実施形態に係る地盤調査装置を示す概略図

[図2] 同じく地盤と発信機、受信機の配置関係を示す模式図

[図3] トモグラフィ法により速度と減衰率が地盤の区画ごとに求められることを示す模式図

[図4] 弾性波の主な減衰について説明をするための模式図

[図5] 本発明の第1実施形態に係る弾性波の速度と減衰率から地盤の状態を判定するときのプロローチャートを示す図

[図6] 同じく弾性波の速度と減衰率に対して地盤の状態を概略的に示す模式図
 [図7] 本発明の第2実施形態に係る弾性波の速度と減衰率の関係から判定可能な地盤の状態を示す模式図

[図8] 本発明の第2実施形態において、実際の測定で得られた速度分布図と減衰率分布図から求められた地盤の断面図

[図9] 図8で得られた速度と減衰率とをプロットしたグラフを示すから判定可能な地盤の状態を示す模式図

[図10] 本発明の第3実施形態に係る弾性波の速度と減衰率の関係を概略的に示す模式図

発明を実施するための形態

[0019] 以下、図面を参照して、本発明の実施形態を詳細に説明する。

[0020] 最初に、主に図1を用いて、第1実施形態に係る地盤調査装置の全体構成

について説明する。なお、以下において、実施形態が異なっても、符号を同一で表示する（従来技術含む）。

[0021] 地盤調査装置100は、図1に示す如く、弾性波102を発信する発信機

(SOR) 120と、地盤104中の経路104Aを伝播してきた弾性波1

02を受信する(複数の)受信機(REC) 124と、受信された弾性波1

02(受信波)に基づいてその間にある地盤104の状態を判定する解析装

置(ANE) 132と、を有する。更に、地盤調査装置100は、単一の周

波数信号(キャリア周波数)を決定して出力可能な周波数発生器(FNG)

112と、周波数発生器112から出力された単一の周波数信号を、位相変換

換して擬似ランダム信号の一つであるPRBS信号(後述)とする位相変換

器(PHC) 114と、を備える。なお、解析装置132は、複数の受信機

124で受信された弾性波102から、受信機124と送信機120の間の

地盤104の断面画像を求めることができる(断面画像の求め方はトモグラ

フィ法として公知)。

- [0022] このため、地盤調査装置 100 は、弾性波トモグラフィ装置として、弾性波 102 を用いて地盤 104 を非破壊で可視化して調査することができる。
- [0023] 以下に、各構成要素について詳細に説明する。
- [0024] 地盤 104 には、図 2 に示す如く、紙面の上下方向に向かうボーリング孔 106 が所定の間隔で設けられている（図 2 では 2 つ）。1 つのボーリング孔 106（図 2 の左側）には、1 つの発信機 120 が上下方向で所定間隔に移動して、発信することが可能とされている。他のボーリング孔 106（図 2 の右側）には複数の受信機 124 が上下方向に所定の間隔で配置されている（即ち、発信機 120 と受信機 124 とは地盤 104 の既知の位置に配置されている）。ボーリング孔 106 に発信機 120 と受信機 124 の全てが配置されている（地盤 104 の内部に配置）。このため、いずれかもしくは両方が地盤 104 の表面に配置されている場合に比べて、受信機 124 は地盤 104 の内部情報をより安定して受信することができる。発信機 120 および受信機 124 については再度後述する。
- [0025] 周波数発生器（FNG）112 は、任意の周波数（単一の周波数）の連続正弦波信号であるキャリア信号を単一の周波数信号（キャリア周波数）としてデジタル出力することができる。なお、周波数発生器 112 は、弾性波 102 の単一の周波数を選択・決定する周波数決定手段を備えているともいえる。周波数決定手段は、例えば、CPU を備えた回路で構成することができる。
- [0026] 位相変換器（PHC）114 は、周波数発生器 112 に接続されている。位相変換器 114 は、周波数発生器 112 から出力された単一の周波数のデジタル信号（単一の周波数信号）を、PRBS 符号で位相変換する。そして、擬似ランダム信号の 1 つである PRBS 信号を DA 変換器 116 に出力する（即ち、PRBS 信号のキャリア周波数が単一の周波数となる）。なお、この出力は、解析装置 132 に対してもなされる。ここで、PRBS 符号は、擬似ランダムバイナリシーケンス（Pseudo-Random Binary Sequence）符号のことである。PRBS 符号は、例えば、

位相変換器 114 内のシフトレジスタとフィードバックによって生成される符号系列のうちその周期が最長になる系列である M 系列（最長系列；Maximal-Length Sequences）を用いている。このため、PRBS 符号は $(2^n - 1)$ 、例えば $n = 12$ のとき 4095 波数であり、排他性が極めて強い。従って、自己相関をとった場合においては、パルス圧縮技術の利点とあいまって、その相関値のピークは高く、S/N 比が非常に高くなる。このように、位相変換器 114 は、周波数発生器 112 から入力された周波数の単一の周波数信号を、自身の内部で生成された PRBS 符号で位相変換している。なお、PRBS 符号は外部から導入してもよい。

[0027] DA 変換器 (DAC) 116 は、位相変換器 114 に接続されて、位相変換器 114 から出力された信号をデジタル値からアナログ値に変換して出力する。

[0028] 発信増幅器 (AMP) 118 は、DA 変換器 116 に接続されて、DA 変換器 116 から出力された信号をアナログ的に増幅して出力する。

[0029] 発信機 (SOR) 120 は、発信増幅器 118 に接続され、発信増幅器 118 から出力された電気的な信号を機械的な振動に変換して発信波としての弾性波 102 を発信・出力する。弾性波 102 は PRBS 信号に変調された単一のキャリア周波数に基づく。本実施形態では、発信機 120 に圧電セラミックスを用いている。このため、小型でありながら安定して機械的な振動を発生させることができる。このような効果は磁歪材を用いても同様に得ることができる。

[0030] 受信機 (REC) 124 は、発信機 120 から地盤 104 中の経路 104A を伝播してきた機械的な振動である弾性波 102 を受信波として受信し、電気的な信号に変換する。受信機 124 としては、ハイドロフォンと呼ばれる水中マイクロフォンなどを使用することができる。

[0031] 受信フィルタ (RCF) 126 は、受信機 124 に接続され、受信機 124 で受信された信号から、例えば、地盤 104 上で発生する交通騒音や工事騒音を取り除く。このため、適切なノイズフィルタを選択することで、受信

フィルタ 126 はそれらの騒音の影響を極めて低減することができる。なお、受信フィルタ 126 は必要に応じて、可変の増幅器を具備してもよい。

[0032] AD変換器(ADC) 128は、受信フィルタ 126 に接続されて、受信フィルタ 126 を通過した信号を、アナログ値からデジタル値に変換する。

[0033] データ記録器(DTR) 130は、AD変換器 128 に接続されて、AD変換器 128 から出力された信号を記録する。

[0034] 解析装置(ANE) 132は、位相変換器 114 とデータ記録器 130 とに接続され、位相変換器 114 から出力される発信波に係る PRBS 信号(擬似ランダム信号)とデータ記録器 130 に記録された受信波による信号との相関値を計算する。この(自己)相関演算によって、弾性波 102 の受信機 124 までの到達時間を正確に測定することができる。到達時間が求まることで、弾性波 102 の速度 V (ここでは P 波速度とする)を求めることができる。同時に、相関値を用いて弾性波 102 の発信当初の振幅強度に対する受信波の振幅強度の比率から減衰率 D も正確に求めることができる。具体的に、発信波の音圧(振幅強度)を AW_i (dB)、受信波の音圧を AW_o (dB)、発信機 120 と受信機 124 との距離を L (m)、弾性波 102 のキャリア周波数を f (kHz) とする。すると、減衰量 AT (dB) と減衰率 D (dB/kHz/m) とは、それぞれ式(1)、式(2)の如く示すことができる。

$$AT \text{ (dB)} = AW_i \text{ (dB)} - AW_o \text{ (dB)} \quad (1)$$

$$D \text{ (dB/m)} = AT \text{ (dB)} / f \text{ (kHz)} / L \text{ (m)} \quad (2)$$

[0035] また、解析装置 132 は、得られた速度 V と減衰率 D のそれぞれに対して設けられる速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} とを記憶しておく。そして、解析装置 132 は、速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} に対する速度 V (後述する速度 V_{ij} を含む) 及び減衰率 D (後述する減衰率 D_{ij} を含む) の比較を行い、地盤 104 の状態の具体的な判定(後述)を行うことができる。なお、判定結果は、解析装置 132 に付随する図示しないモニターやプリンタなどで断面画像や速度—減衰率のグラフにプロットされる。若しくは、

判定結果は、解析装置 132 に電子データとして格納される。

[0036] また、解析装置 132 は、発信機 120 のボーリング孔 106 の各所定の位置に対応した各受信機 124 の所定の位置で求められたデータ（上記速度 V と減衰率 D ）を用いて、ボーリング孔 106、106 間の地盤の断面画像（トモグラム）を求めることができる。具体的に説明すると、（公知である）トモグラフィ法により、図 3 に示すボーリング孔 106、106 間のメッシュ状に区切られた区画 A_{ij} （ $i, j = 0, 1, 2 \dots$ ）毎に、速度 V_{ij} と減衰率 D_{ij} を求めることができる。

[0037] このように、解析装置 132 は、相関演算によるパルス圧縮技術を利用した高い S/N 比で、地盤 104 中の区画 A_{ij} で構成される経路 104A の状態を判定することが可能である。

[0038] ここで、減衰量 A_T について以下に説明する。

[0039] 地盤中の減衰量 A_T は、式（3）に示すように、距離減衰と、粘性減衰と、透過減衰と、散乱減衰との和として表示される。

$$\text{減衰量} = \text{距離減衰} + \text{粘性減衰} + \text{透過減衰} + \text{散乱減衰} \quad (3)$$

[0040] 距離減衰は、その距離に応じて大きくなる減衰を示している。粘性減衰は、弾性波が通過する際に土粒子 SP と水 W との振動が一致しないことで、土粒子 SP と水 W との間の摩擦で生じる減衰である（図 4（A））。粘性減衰は、多孔質媒体内の波動理論、Biot 1955 などで計算できる。例えば $1\text{ kHz} \sim 20\text{ kHz}$ のキャリア周波数を用いる場合には、粘性減衰は、完全に飽和した地盤 104 において大きな粒径ほど大きく、即ち砂では粘性減衰は大きく粘性土では小さくなる。なお、同多孔質媒体内の波動理論によれば、粘性減衰は地盤の緩みの影響を受けにくい。透過減衰は、密度の異なる物質に弾性波が入射・透過（密度 D_1 から D_2 への透過）する際に熱エネルギーに変換されて起る減衰である（図 4（B））。透過減衰は、地層境界などで起こり、地盤中の気泡（以下ガスを含む）などの密度の小さな部分を透過すると大きくなる。散乱減衰は、密度の異なる物質に弾性波が入射する際に反射や散乱で生じる減衰である（図 4（C））。散乱減衰は、礫などの

弾性波の波長の $1/4 \sim 1/2$ より大きな物体が存在する場合に生じ、礫層や転石が多い地盤では大きくなる。

[0041] 次に、弾性波 102 の速度 V と減衰率 D を用いた地盤 104 の状態の判定方法について図 5 を用いて説明する。その判定結果を図 6 に示す。

[0042] まず、地盤 104 の既知の位置に受信機 124 と弾性波 102 を発信する発信機 120 とを配置する。

[0043] 次に、発信機 120 から PRBS 信号による弾性波 102 を発信させ、発信機 120 から受信機 124 に向かう地盤 104 中の経路 104A を伝播してきた弾性波 102 を受信機 124 で受信する。

[0044] 次に、PRBS 信号と受信された弾性波 102 との相関値を計算して、伝播してきた弾性波 102 の速度 V と減衰率 D を求める。

[0045] 次に、速度 V と減衰率 D とから、公知のトモグラフィ法により各区画 A_{ij} 毎に速度 V_{ij} と減衰率 D_{ij} とを求める（ステップ S8）。そして、速度分布図と減衰率分布図とを求める。

[0046] 次に、速度 V_{ij} の値と減衰率 D_{ij} の値とをそれぞれ速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{ij} と比較して場合分けする。

[0047] ここで、一般的に速度は地盤の固さや間隙率と良い相関を持ち、地盤が砂では速度が大きく、粘性土では速度が小さくなり、気泡やガス（単に気泡と称す）が混入している地盤では速度は小さくなる。

[0048] また、弾性波の減衰は、上述の如く、粘性減衰や透過減衰や散乱減衰などの和によって生じている。粘性減衰は、水で完全に飽和した地盤において、大きな粒径ほど大きく、即ち砂では粘性減衰は大きく粘性土では小さくなる。透過減衰は、密度の異なる物体を透過する際に起る減衰で、これは地盤中の気泡（以下ガスを含む）などの密度の小さな部分を透過すると大きくなる。散乱減衰は、礫などの弾性波 102 の波長の $1/4 \sim 1/2$ より大きな物体が存在する場合に、反射や散乱で生じる減衰であり、礫層や転石が多い地盤では大きくなる。

[0049] このため、減衰率 D_{ij} と速度 V_{ij} を組み合わせて場合分けする。即ち

、減衰率 D_{ij} と速度 V_{ij} のそれぞれに対して減衰率閾値 D_{sh} と速度閾値 V_{sh} とを設け、減衰率閾値 D_{sh} と速度閾値 V_{sh} とに対する減衰率 D_{ij} 及び速度 V_{ij} の比較を行うことで地盤104の状態の判定をする。

[0050] まず、速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} とに対して、速度 V_{ij} が大きく減衰率 D_{ij} が大きい場合（ステップS10、S12でYes）には、地盤104が気泡を含まない砂層であり礫を含んでいる状態（砂SA、ゆるい砂LS、砂礫（礫のみを含む）SCの状態CONDITION1）（ステップS14）であることが判定される。

[0051] また、速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} とに対して、速度 V_{ij} が大きく減衰率 D_{ij} が小さい場合（ステップS10でYes、ステップS12でNo）には、地盤104が気泡やガスや礫を含まない砂層であり、減衰率 D_{ij} が更に小さい場合には硬質粘性土の可能性がある状態（硬い粘性土TC若しくは締まった砂TSの状態CONDITION2）（ステップS16）であることが判定される。

[0052] また、速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} とに対して、速度 V_{ij} が小さく減衰率 D_{ij} が大きい場合（ステップS10でNo、ステップS18でYes）には、地盤104が気泡やガスを含む粘性土又は礫を含む粘性土である状態（気泡Fを含む粘性土FC若しくは気泡Fを含む砂FSの状態CONDITION3）（ステップS20）であることが判定される。

[0053] また、速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} とに対して、速度 V_{ij} が小さく減衰率 D_{ij} が小さい場合（ステップS10、S18でNo）には、地盤104が気泡やガスを含まない粘性土である状態（ゆるい粘性土LC若しくは粘性土CRの状態CONDITION4）（ステップS22）であることが判定される。

[0054] つまり、速度だけでは、図6における砂礫SC、砂SA、そして締まった砂TS、また、ゆるい砂LS、そして硬い粘性土TC、また、気泡Fを含む粘性土FC、気泡Fを含む砂FS、そして粘性土CRは、それぞれを区別できない。しかし、減衰率閾値 D_{sh} を用いることでそれらの状態を区別する

ことが可能となる。

[0055] このように、速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} とを用いて、速度－減衰率の関係から、解析装置132は、一義的に地盤104の状態を迅速に判定することができる。なお、地盤104の状態を断面画像として必ずしも示さないで、図6を作成するのみで地盤104の状態の判定や、場所ごとの比較を容易に行うこともできる。

[0056] 本実施形態においては、速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} は、それぞれ1.6 km/s、0.3 dB/kHz/mとしている。一般的な堆積層で速度と減衰率は、それぞれ、約1.5～1.7 km/s、約0.1～0.3 dB/kHz/mであるが、地盤104によって異なり、この範囲外に速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} とを設けてもよい。これらの閾値はボーリング情報と比較することで補正することができる。

[0057] このように、本実施形態では、粘性減衰を含めた減衰量 A_T に基づいた減衰率 D から地盤104の状態の判定を行うものである。このため、従来（粘性減衰のみを用いる方法や減衰率を用いない方法）に比べてより正確な地盤104の状態の判定が可能である。

[0058] なお、地盤が局所的にゆるんでいる場合には速度の変化には現れない微細な気泡が存在していることが多く、速度は変化しないが減衰率のみ大きくなる場合がある。このような関係を利用することで、解析装置132は、地盤104の緩みをも判定することができる。

[0059] 第1実施形態では、速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} とがそれぞれ1つのみ設けられていた。そして、地盤104の状態を、砂、ゆるい砂、若しくは砂礫の状態と、硬い粘性土若しくは締まった砂の状態と、気泡を含む粘性土若しくは気泡を含む砂の状態と、ゆるい粘性土若しくは粘性土の状態と、に判定していたが、本発明はこれに限定されない。

[0060] 例えば、第2実施形態として速度閾値 V_{sh} と減衰率閾値 D_{sh} の少なくともいずれかを複数設けて、更に細かく判定することもできる。その場合には、図6で示された全ての状態を区別することも可能となる。例えば、弾性

波102の速度 V （以下、 V_{ij} も V で表示する）の 1.5 km/s と 1.6 km/s との間と、 1.6 km/s と 1.7 km/s との間と、に速度閾値 V_{sh} をそれぞれ（計2つ）設ける。そして、弾性波102の減衰率 D （以下、 D_{ij} も D で表示する）の 0.05 dB/kHz/m と 0.1 dB/kHz/m との間と、 0.1 dB/kHz/m と 0.2 dB/kHz/m との間と、 0.2 dB/kHz/m と 0.3 dB/kHz/m との間と、 0.3 dB/kHz/m と 0.5 dB/kHz/m との間と、に減衰率閾値 D_{sh} をそれぞれ（計4つ）設ける。

[0061] 従来においても速度 V を高精度に計測することで、速度 V を3つ（ 1.5 km/s 、 1.6 km/s 、 1.7 km/s ）について場合分けすることは可能と考えられる。その場合には、図7において、速度 1.5 km/s からゆるい粘性土層 G_1 が判別できるがその中の転石 S は判別することができない。また、速度 1.6 km/s からゆるい砂層 G_2 若しくは締まった粘性土層 G_3 が判別できるが、そのいずれかは特定できない。また、締まった粘性土層 G_3 中の気泡（地中ガス） F の存在を判別することができない。また、速度 1.7 km/s から締まった砂層 G_4 、礫層 G_5 、若しくは硬く締まった粘性土層 G_6 が判別されるが、そのいずれかは特定できない。

[0062] これに対して、第2実施形態であれば、速度閾値 V_{sh} に4つの減衰率閾値 D_{sh} を組み合わせることで、図7で示される地盤104をより高精度に判定できる。ゆるい粘性土層 G_1 においては、減衰率 D が 0.05 dB/kHz/m であるのに対して、同じ速度 V であっても転石 S の減衰率が大きい（ 0.2 dB/kHz/m ）ので、転石 S の存在を特定可能である。また、ゆるい砂層 G_2 と締まった粘性土層 G_3 では同じ速度 V であってもゆるい砂層 G_2 の方が減衰率 D が大きい（ 0.05 dB/kHz/m に対して 0.3 dB/kHz/m ）。このため、ゆるい砂層 G_2 に対して締まった粘性土層 G_3 の特定が可能である。また、締まった粘性土層 G_3 中の気泡 F の減衰率 D はゆるい砂層 G_2 よりもはるかに大きい（ 0.5 dB ）ので、気泡 F の存在も特定が可能である。更に、締まった砂層 G_4 と礫層 G_5 と硬く締まった

粘性土層 G6 とは同じ速度 V であっても、締まった砂層 G4 の減衰率 D (0.1dB) に比べて、礫層 G5 の減衰率 D が大きく (0.5dB)、硬く締まった粘性土層 G6 の減衰率 D が小さい (0.05dB)。このため、締まった砂層 G4 と礫層 G5 と硬く締まった粘性土層 G6 の特定も容易に行うことが可能である。

[0063] 本実施形態の地盤 104 の状態の判定方法を、実際の東京湾沿いの埋立地において計測して得られた速度分布図と減衰率分布図に当てはめた結果を図 8 に示す。計測は、ボーリング穴 106 間の距離を 6m、5.5m として、

その測定深度は 6.5m である。図 8 (A) で示す図は速度分布図であり、図 8 (B) で示す図は減衰率分布図である。それぞれにおいて、判定された地盤 104 の状態を G10 から G19 で示している。G10 はゆるい砂層 (Loose sand; 沖積砂層) であり、G11 はゆるい粘性土層 (Clay; 沖積粘性土層)、G12 は粘性土と砂の中間の粒子からなるゆるいシルト層 (Silt; 沖積シルト層)、G13 は砂とシルトとの互層、G14 は締まった砂層 (Dense sand; 洪積砂層)、G15 は締まった粘性土層 (Hard Clay; 洪積粘性土層) で、G16 は粘性土層の気泡 (Soil gas; 有機ガス) である。

[0064] これらの構成データを速度—減衰率のグラフに表すと、図 9 の白抜き丸で示すことができる。ここで、波線の矢印は、主に砂と粘性土の違いを表している。また、実線の矢印は、主に飽和した地層と不飽和の地層の違いを表している。なお、波線の丸で囲んだエリア H1 は、エリア H2 と比べて、実線の矢印の線上から外れている。このことから、エリア H1 とエリア H2 との間に適切な減衰率閾値 D_{sh} を設けることで、気泡 (有機ガス) の存在を明確に判断することができる。即ち、地盤 104 の状態を、速度 V に対する速度閾値 V_{sh} との比較により、砂、シルト、若しくは粘性土の地盤 104 の主成分の粒度の違いについて主に判定し、更に、減衰率 D に対する減衰率閾値 D_{sh} との比較により、気泡若しくは礫を含む状態から地盤 104 の締まった状態までの地盤 104 の飽和状態の違いについて主に判定することで、

より正確な地盤 104 の判定が可能となる。

[0065] このように地盤 104 の状態を判別すること、例えば、地盤 104 中の礫を避けてシールドソノルを掘るといったことも可能となる (例えば礫があるとシールドマシンが止まってしまうおそれがある)。

[0066] また、上記実施形態においては、地盤 104 が、礫、砂、あるいは粘性土などを含むものであったが、本発明はこれに限定されない。例えば、コンクリートなどの人工的にできた床面や基礎構造物など又は岩盤であってもよい。第 3 実施形態として、地盤 104 がコンクリート又は岩盤である場合について図 10 を用いて説明する。

[0067] 速度閾値 Vsh (例えば 1.6 km/s) よりも求められた速度 V が大きければ、地盤 104 を亀裂のない岩盤 R2 として判定する (CONDITION 102)。速度閾値 Vsh よりも求められた速度 V が小さければ、地盤 104 に亀裂があることが判明する。その際に、求められた減衰率 D が減衰率閾値 Dsh (例えば 0.3 dB/kHz/m) よりも大きければ、亀裂 CR1 の間に存在するのが気泡 (ガス含む) であると判定できる (CONDITION 103)。求められた減衰率 D が減衰率閾値 Dsh よりも小さければ、亀裂 CR2 の間に存在するのが氷やその他の物質であることを判定することができ (CONDITION 4)。このとき、減衰率閾値 Dsh を更に小さな値で別に設けることで、水か例えばコンクリートなどが特定可能となる。

即ち、地盤 104 がコンクリート又は岩盤であり、速度閾値 Vsh により地盤 104 の亀裂の有無を判定し、減衰率閾値 Dsh により亀裂の間に存在する気泡や水やコンクリートなどの地盤構成媒体を判定してもよい。例えば岩盤にシールドソノルを掘る場合や若しくはダムのコングリート基礎構造物を調べる場合に、内部に亀裂が見つかりその亀裂の内側に水が存在すれば、その水を抜きコンクリートで充填するといったことが必要となる。そのとき、上記の如く 2 つの減衰率閾値 Dsh を適切に設けることで、亀裂の有無や、亀裂の間にあるのが空気、水、若しくはコンクリートであるのかを判別することができる。このため、シールドソノルの掘削やコンクリート

基礎構造物の評価を行い、その上でその補修程度を迅速に調査できるので、従来に比べてこのような土木作業の更なる効率化を図ることができる。

[0068] なお、地盤 104 の状態の判定に際して、使用する周波数が単一であり、擬似ランダム信号である PRBS 信号と受信された弾性波 102 との相関が取られるので、高い S/N 比で地盤 104 の解析を行うことができる。そして、図 2 に示す如く、一度に多くの受信機 124 で弾性波 102 を受信するので、地盤 104 の断面の広範囲な可視化が容易である。又、経路 104A は発信機 120 と受信機 124 との間にあり、地盤 104 の状態の判定においては、基本的に透過波を用いているので、より高い S/N 比を確保することができる。

[0069] 更に、単一の周波数に対して擬似ランダム符号で変調制御された PRBS 信号を用いることで、従来（～200Hz 程度）よりも高い周波数での発信と受信とが可能となる。上記実施形態では、20kHz での計測が可能となっている。これにより従来の数 10 倍以上の計測分解能で地盤 104 の調査が可能である。例えば地盤 104 中の弾性波 102 の速度を 2km/s とすると、従来であれば分解能が 5m 程度となるが、上記実施形態では 0.2m 程度の分解能が得られる。なお、暗騒音（地盤 104 上での交通騒音、工事騒音など）の周波数帯域は低いので、暗騒音の影響を受けにくくすることもできる。

[0070] また、弾性波 102 は、周波数が高くなるにつれ、指数関数的に減衰する傾向があり、高い周波数の弾性波 102 を遠距離に伝播させることが困難である。しかし、PRBS 信号を用いることで、弾性波 102 のエネルギーを時間軸上に分散させることができるため、従来（数 m 程度）に比べて高い周波数の弾性波 102 を数 100m 伝播させることができる。上記実施形態では、1kHz で 400m 以上、30kHz でも 20m 以上を伝播させることが確認できている。

[0071] つまり、PRBS 信号と相関演算を用いることで、高い周波数を用いながら弾性波 102 を遠距離伝播させることができ、地盤 104 上の騒音（振動

を含む)にほとんど影響を受けることなく、精度の高い計測を行って地盤 104 の状態の判定が可能である。

[0072] 即ち、上記実施形態によれば、地盤 104 内部の構造や局所的なゆるみ、空洞、礫の存在などを一度に広範囲に可視化することができ、地盤 104 の状態を精度よく判定して地盤 104 の誤った解釈を回避することが可能となる。具体的には以下のようなことが可能となる。実際の地盤 104 における弾性波 102 の減衰を求めて、それを地盤 104 の状態の判定に用いる。このため、地盤 104 中の弾性波 102 の速度 V と減衰率 D とを組み合わせることができ、地盤 104 の状態を正確に判定できる。

[0073] また、擬似ランダム信号を用いているので、キャリア周波数に高い周波数を用いても弾性波 102 を遠距離伝播させることができる。結果として精度の高い計測と、暗騒音（地盤 104 上での交通騒音、工事騒音など）の影響を受けない計測が可能となる。

[0074] なお、弾性波 102 の代わりに電磁波を用いる方法も考えられる。しかし、電磁波は、水があると吸収されやすいことと、電気ノイズに弱い。即ち、鉄塔があるような場所や都市部、そして地下水や海水などの水面下に対しては、電磁波を用いる手法は適用が困難である（このため、電磁波を用いるトモグラフィ法では、山間部で地下水の水面より上で用いることに用途が限られる傾向がある）。これに対して、上記実施形態では、弾性波 102 を用いているので、上記の制限はなく、電磁波を用いる場合に比べて広く適用することができる。即ち、上記実施形態は、石油や天然ガスの埋蔵場所や、メタンガスなどの腐臭ガス（有機ガス）の場所など、場所が限定されずに調査することもできる。例えば湾岸（東京湾や大阪湾など）において構造物建設のためにくい打ちする際に、腐臭ガスの噴出などの災害の防止にも上記実施形態は有効な手法である。

[0075] 本発明について上記実施形態を挙げて説明したが、本発明は上記実施形態に限定されるものではない。即ち、本発明の要旨を逸脱しない範囲においての改良並びに設計の変更が可能なのは言うまでもない。

- [0076] 例えば、上記実施形態においては、発信機 120 に圧電セラミックス又は磁歪材を用いることとしていたが、本発明はこれに限定されず、別のものを用いてもよい。
- [0077] 又、上記実施形態においては、弾性波 102 が擬似ランダム信号で変調された単一のキャリア周波数に基づいていた。擬似ランダム波を用いることで、格段に優れた S/N 比で速度 V と減衰率 D とを求められることが発明者によって実証されているが、必ずしも擬似ランダム波を用いなくてもよい。また、擬似ランダム信号としては、M 系列を用いた PRBS 信号であったが、本発明はこれに限定されるものではなく、擬似ランダム信号として、Gold 系列や Barker 系列などであってもよい。
- [0078] 又、上記実施形態においては、擬似ランダム信号と受信された弾性波 102 との相関演算を行っていたが、本発明は必ずしもこれに限定されない。
- [0079] 又、上記実施形態においては、発信機 120 と受信機 124 とがボーリング孔 106 に配置されていたことで、地盤 104 の極表面の地盤情報や表面から伝わるノイズを最小限にして、精度の高い地盤 104 の状態の把握を可能としていた。即ち、上記実施形態は、従来波線密度の低下を防ぐために地盤 104 の表面に配置されていた受信機 124 を省略することができるが、本発明はこれに必ずしも限定されない。例えば、発信機 120 と受信機 124 のいずれか若しくは両方とも地盤 104 の表面に配置されていてもよい。その際には、発信機 120 と受信機 124 の配置を簡便に行うことが可能となる。
- [0080] 又、上記実施形態においては、擬似ランダム信号と弾性波 102 との相関をとることで、弾性波 102 の速度 V と減衰率 D が求められていたが、本発明は弾性波 102 の速度 V と減衰率 D が求められる手段を限定するものではない。なお、上記実施形態においては、弾性波 102 の速度 V と減衰率 D から更にトモグラフィ法により区画 A_{i j} ごとの速度 V_{i j} と減衰率 D_{i j} が求められ、そこから区画 A_{i j} 毎の地盤 104 の状態が判定されていたが、本発明はこれに限定されない。トモグラフィ法の前段階の弾性波 102 の速

度Vと減衰率Dから大まかに地盤104の状態の判定を行ってもよい。

産業上の利用可能性

[0081] 本発明は、弾性波（音響波を含む）を用いて、コンクリート構造物や岩盤を含む地盤内部の構造や局所的なゆるみ、空洞、礫の存在などを一度に広範囲に非破壊で可視化して調査する方法に適用することができる。

符号の説明

- [0082] 100…地盤調査装置
- 102…弾性波
- 104…地盤
- 104A…経路
- 106…ボーリング孔
- 112…周波数発生器
- 114…位相変換器
- 116…DA変換器
- 118…発信増幅器
- 120…発信機
- 124…受信機
- 126…受信アンテナ
- 128…AD変換器
- 130…データ記録器
- 132…解析装置

請求の範囲

- [請求項1] 弾性波を用いて地盤を非破壊で可視化して調査する地盤調査方法において、
- 前記地盤の既知の位置に受信機と前記弾性波を発信する発信機とを配置し、
- 該発信機から前記弾性波を発信させ、
- 該発信機から前記受信機に向かう前記地盤中の経路を伝播してきた前記弾性波を該受信機で受信し、
- 該伝播してきた該弾性波の減衰率と速度とを求めて、
- 該減衰率と速度のそれぞれに対して1つ以上の減衰率閾値と速度閾値とを設け、該減衰率閾値と速度閾値に対する該減衰率及び速度の比較により前記地盤の状態を判定することを特徴とする地盤調査方法。
- [請求項2] 前記地盤の状態を、前記速度に対する前記速度閾値との比較により、砂、シルト、若しくは粘性土の前記地盤の主成分の粒度の違いについて主に判定し、
- 更に、前記減衰率に対する前記減衰率閾値との比較により、気泡若しくは礫を含む状態から前記地盤の締まった状態までの前記地盤の飽和状態の違いについて主に判定することを特徴とする請求項1に記載の地盤調査方法。
- [請求項3] 前記地盤の状態を、砂、ゆるい砂、若しくは砂礫の状態と、硬い粘性土若しくは締まった砂の状態と、気泡を含む粘性土若しくは気泡を含む砂の状態と、ゆるい粘性土若しくは粘性土の状態と、に判定することを特徴とする請求項2に記載の地盤調査方法。
- [請求項4] 前記地盤がコンクリート又は岩盤であり、前記速度閾値により該地盤の亀裂の有無を判定し、前記減衰率閾値により該亀裂の間に存在する地盤構成媒体を判定することを特徴とする請求項1に記載の地盤調査方法。
- [請求項5] 前記弾性波は擬似ランダム信号で変調された単一のキャリア周波数

に基づくことを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の地盤調査方法。

[請求項6] 前記擬似ランダム信号と前記受信された弾性波との相関演算を行うことで、前記減衰率と速度とを求めることを特徴とする請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の地盤調査方法。

[請求項7] 前記発信機と受信機がすべて前記地盤の内部に配置されることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれかに記載の地盤調査方法。