

微動チェーンアレーによる浅部探査

十数メートル程度までの深度に関する微動探査の適用性

今井 博^{*1}・青木 智幸^{*1}・石井 裕泰^{*1}

Keywords : natural tremor, chain array, S wave, velocity structure, shallow depth, dispersion curve

自然微動, チェーンアレー, S波, 速度構造, 地盤浅部, 分散曲線

1. はじめに

地盤内の空洞調査, 地盤内の緩み領域の概査, 地盤内の物性評価, 地盤内大型不発弾探査など, 様々な場面で, 都市部における極浅層部探査への期待は大きい。

物理探査の分野における地盤探査のうち, 非破壊で探査深度が地表から十数m程度までの地盤(以下, 浅層地盤という)内の力学的物性を推定するには, 直接剛性率に関係する弾性波が有効であると考える。

通常, 地盤内の層構造の弾性波調査では, 屈折法や反射法が用いられるが使用できない。なぜなら, 弹性波屈折法では, 下層境界に斜め入射する地震波を用いるので, 「硬一軟」の境界面では, 入射側の層の弾性波速度と比べて射出側の層の弾性波速度は遅くなり, 入射角よりも射出角の方が小さくなる(スネルの法則)からである。したがって, 以深の速度の速い層に到達するまで震波線は地表には戻って来ない。

一方, 弹性波反射法では, 地盤内反射面構造を調査することや, 速度解析による速度構造の推定で利用されているが, 浅層地盤内の反射層の厚さや「硬一軟」の推定には, 解像度が要求される。解像度が良いといわれるS波による反射法は, 50m~100m以深のS波速度構造を探査で利用されている。浅層地盤内探査に対しては, 速度解析(重合速度推定)における数m程度の誤差を考えると, その適用は難しいとされている。

これに対して, 近年, 浅層地盤内探査で, 微動アレー法や微動チェーンアレー法を利用している例がある。長ら¹⁾は半径0.3mの円周上に上下動地震計を等間隔に5点配置し, レーリー波の位相速度を推定するため自ら開発した, 逆解析を用いないCCA解析法を用いて, 波長数10mまでのレーリー波位相速度を高精度で推定

できるとしている。林ら²⁾は2007年の能登半島地震後, 被災地である石川県穴水町において, 地表から数十mまでのS波速度構造を, 表面波探査および微動アレー探査を用いて調査を行った。後者では, 30m以浅を調査するため, アレーサイズを25m~75mの正三角形としている。深度17m以浅で, 表面波探査および微動アレー探査の結果はPS検層結果とほぼ一致したと報告している。

また, ごく最近の例として, 泉並ら³⁾は, 盛土した鉄道の軌道に関する橋台背面盛土内部の可塑性セント(水平方向)と微粒子セメント(垂直方向)による改良の前後で, 微動チェーンアレーを用いた調査を行った。ピッチ1.16mの三角形を12個連結した状態で計測し, 通常用いられているSPAC(SPatial AutoCorrelation)法(後述)で解析している。結果は, 盛土内部調査で適用できる可能性が高いとしながらも, 評価に曖昧性を残している。ここに示したSPAC法は, 短周期微動をアレイ観測し, 表面波の位相速度を検出する方法としてAki⁴⁾により開発された。

表面波法には, 人工振源を必要とする狭義の表面波探査法と, 人工振源を使用せず, 自然地盤内を伝搬する表面波を捉える微動アレー探査法と, その1種である微動チェーンアレー探査法がある。

これまで述べてきたように, 地表から数十mまでの浅層地盤の構造を評価する弾性波探査法として, 表面波法が考えられる。地盤振動特性や液状化状況を調査する場合, 広範囲な測線が得られない市街地などの実施状況を想定し, 本研究では, 人工振源を必要とせず自然微動(表面波)を計測する微動チェーンアレー法を選択し, 地盤改良により「軟一硬一軟」という層構造を持つ実地盤を用いて, その適用性を検討することとした。

*1 技術センター 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室

2. 弹性波表面波探査

すでに述べたように、弹性波表面波探査法には、①狭義の表面波探査法、②微動アレー探査法、③微動チーンアレー探査法、がある。いずれにしても、地盤上部でエネルギーを持つラブ波やレーリー波を利用する。その特徴は、実体波と呼ばれるP波やS波とは異なり、速度に周波数依存性があることである。一般的に、弹性波は弹性波理論から、多くの周波数の波形群で構成されている、という仮定で解析してきた。その代表的解析方法はスペクトル解析である。

実体波を表す一般形は、

$$\exp\left\{i\omega\left(t-\frac{x}{V}\right)\right\} \quad (\omega=2\pi f) \quad (1)$$

であるが、表面波と呼ばれるラブ波やレーリー波は

$$\exp\left\{i\omega\left(t-\frac{x}{V(f)}\right)\right\} \quad (2)$$

と表され、位相速度は周波数に依存している。

一般的に、周波数に対する位相速度や群速度のプロットを分散曲線と呼ぶ。表面波探査では、主として、位相速度の分散曲線を評価し、地盤内部のS波構造を推定する。

3. 原理

ここでは、本研究で実施した表面波探査微動アレー法および微動チーンアレー法に関する原理の概要を述べる。いずれの方法も正三角形の受振器配置を基本とし、その正三角形の重心直下のS波速度構造を得る。

まず、微動アレー法での受振器の配置である。図-1

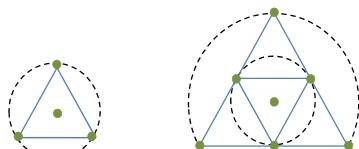


図-1 微動アレー法の受振器配置
Fig.1 Geophone placement of microtremor array method

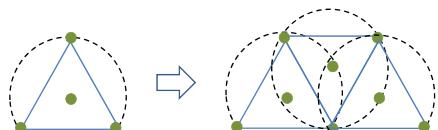


図-2 微動チーンアレー法の受振器配置
Fig.2 Geophone placement of microtremor chain array

に示すように、1つ正三角形の頂点に3個の受振器および重心の計4個を配置するタイプと同心円状に内接

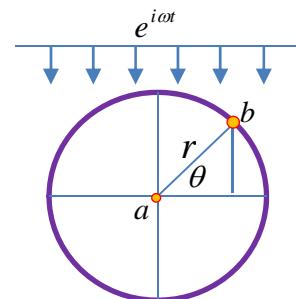


図-3 入射波の位相差モデル
Fig.3 Phase difference model of the incident wave

する小さな逆正三角形を含め、受振器を7個配置するタイプがある。このとき、探査対象深度により三角形の1辺の長さを選ぶ。探査深度は、この1辺の長さの約10倍程度とされている。図-2は、三角形を横方向に並べて探査する方法である。この場合、簡易的に三角形の中央の受振器を省略する方法もある。図-1の配置は、深度が数100m程度など、大深度で利用されている方法であり、浅層地盤で、あるいは、道路に沿った探査測線が図-2の受振器配置で利用されている場合が多く、本研究でも、後述する測線を考慮し、図-2に示した方法を採用した。

微動（表面波）は、ラブ波やレーリー波であるが、地盤内粒子運動が異なり、SH波的振動をするラブ波は水平面内で起きるが、SV波的振動をするレーリー波は上下断面内で起きる。通常、扱いやすい上下動成分のジオフォンを用いることでレーリー波測定を行う場合が殆どである。

さて、図-3に示すように、レーリー波の振動 $e^{i\omega t}$ が観測点 a および b で測定される場合を考える。円の中央 a で、観測されるレーリー波の振動 w_a (速度 c) を

$$w_a = \exp(i\omega(t - \frac{x}{c})) \quad (3)$$

とする場合、円周上の b で、観測されるレーリー波の振動 w_b は、 $r \sin \theta$ 分の距離差があり、

$$w_b = \exp\left\{i\omega\left(t - \frac{r - r \sin \theta}{c}\right)\right\} \quad (4)$$

であるよう w_a と位相差が生ずる。ここで、空間自己相関関数 Ψ を以下の式(5)のように定義する（「*」は複素共役を意味する）：

$$\Psi = \frac{\frac{1}{T} \int_T w_a^*(t) w_b(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_T w_a^*(t) w_a(t) dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_T w_b^*(t) w_b(t) dt}} \quad (5)$$

ここで、式(3)および式(4)を式(5)に代入して計算すると

$$w_b = \exp \left\{ i \omega \left(t - \frac{r}{c} \sin \theta \right) \right\} \quad (6)$$

となる。円周上に観測点を多点設けて、平均すると、

$$\Psi(\omega, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \exp \left(-i \frac{\omega r}{c} \sin \theta \right) \right\} \quad (7)$$

となる。ここで

$$J_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(ix \sin \theta) d\theta \quad (8)$$

なる0次のベッセル関数 J_0 の公式を用いれば、

$$\Psi(\omega, r) = J_0 \left(-\frac{\omega r}{c} \right) = J_0 \left(\frac{\omega r}{c} \right) \quad (9)$$

と書き換えられる。特に、

$$SPAC(f, r, c) = J_0 \left(\frac{\omega r}{c} \right) = J_0 \left(\frac{2\pi f r}{c} \right) \quad (10)$$

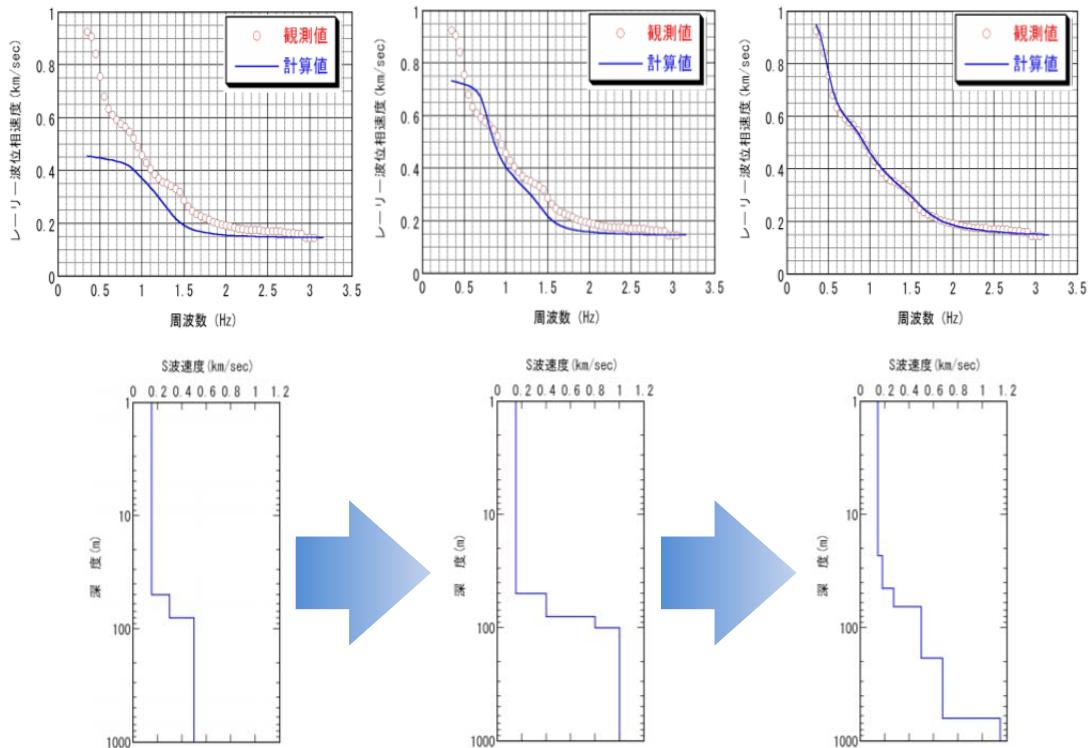


図-4 解析の流れの例
Fig.4 Example of the flow of the analysis

と書いて、SPAC関数と呼んでいる。SPAC関数を用いた調査方法がSPAC法(既述)である。

表面波は、式(9)で、 $p = 2\pi f r / c$ と書いたとき、位相速度 c に周波数 f の依存性(分散性)がある。すなわち、 r 、 p を一定とするとき、 $c(f) = (2\pi/p)f$ である。この分散性をグラフで描いたのが分散曲線(既述)であり、この分散曲線はS波の速度構造(水平構造)から計算できる。したがって、観測された分散曲線を説明するS波速度構造をインバージョンで求められる。

4. 解析方法

微動アレー調査や本研究で用いたの微動チェーンアレー調査では、受振器で捉えたレーリー波について、速度分散曲線(観測値)を描き、一方で、S波速度構造のモデルを設定し、そのモデルから順解析で求めたレーリー波の速度分散曲線(理論値)を作成し、両者を比較し、最小二乗法を用いてその差が最小になるように、S波速度構造のモデルを修正しながら、最適解を解析結果として出力する(図-4)。この際、ボーリングデータから層境界の位置が分かっている場合には、解析でキャリブレーションデータとして利用することにより、さらに精度の良い結果を得ることができる。

5. 実験概要

5.1 実験位置

実験は、千葉県浦安市運動公園内で実施した^{4), 5)}。この地区は、東日本大震災（2011年3月11日、モーメント・マグニチュード Mw=9.0）で液状化が発生した場所である。地盤改良の計画図を図-5に示す。また、実験を行った地盤改良現場の、改良の前後の状況を写真-1に示す。壁状1本はラインからはずれた位置となっている（→で示す）。地盤改良で用いた改良体は、セメントと現地の砂の複合体である。

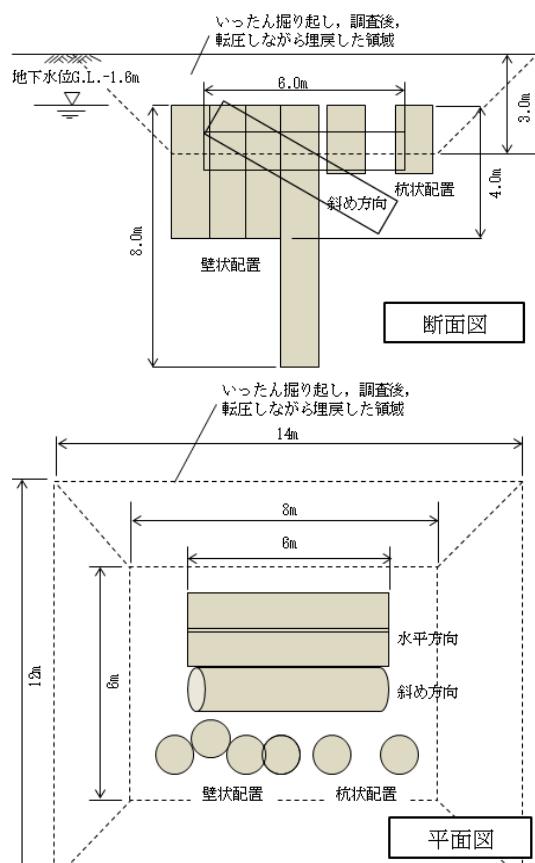


図-5 地盤改良計画図

Fig.5 Illustrations of the plan of the ground improvement



写真-1 実験現場状況（地盤改良前と改良後）

Photo 1 States of the experimental field
(before and after the ground improvement)

5.2 計測機器

表-1に、受振器とデータレコーダの仕様を示す。受振器は0.1～50Hz対応の速度計（固有周期5/7秒）を使用した。データレコーダは、7ch用で24bitの分解能を持つ。計測で使用した計測機器を写真-2に示す。受振器以外の計測データ収録機器は車の荷台に設置した。

表-1 測定機器の仕様

Table 1 Specifications of measuring equipments

機器名	形式	仕 様	
受振器 LE-3D/5S	Geode	内蔵受振器	速度型上下・水平3成分
		固有周期	5秒/7秒 切り替え式
		電源	DC12V
		ローパスフィルタ	1.5/5/15Hz 切り替え式
		有効周期	0.1～50 Hz
		出力感度	4V/kine
7ch データ レコーダ	Geode	入力チャンネル数	24ch/台
		サンプリング間隔	8 msec (0.02～16 msec)
		記録長	最大 65,536 サンプル
		A/D 分解能	24 ビット
		ダイナミックレンジ	144dB
		ひずみ	0.0005%
		寸 法	25cm×31cm×18cm
		重 量	3.5kg
		電源	DC12V
		データ・ロガー	512 秒(8 分)
		測定時間	1回の測定時間は約 16 分
		データ数	6400 サンプル×2

受振器
Geophoneデータレコーダ 7ch 計測用
Data recorder for 7 ch lines計測用 PC とデータロガー
PC and Data logger

写真-2 微動チェーンアレーの計測機器

Photo 2 Instruments of the microtremor
chain array method

5.3 受振器配置・計測

本研究で用いた微動チェーンアレーに関する受振器の配置および交差部の拡大図を図-6に示す。2次元断面として得られる解析結果は、図中の「解析測線」上で得られる。図-7に示すように、微動計測では、受振

器8個分を1つのユニットとして15~17分ほど計測し、重なりあうように移動しながら計測する。

写真-3-①はミニサイズの微動アレー受振器配置状況で、本計測では、微動アレー受振器配置を3個分のチェーン配置とした(写真-3-②)。三角形の1辺は2mで、三角形の頂点に5個、三角形の中心に3個、受振器を配置した。風がノイズ源となり、数十分対処した(写真-3-③)。写真-3-④はL2測線の測量後の状況である。

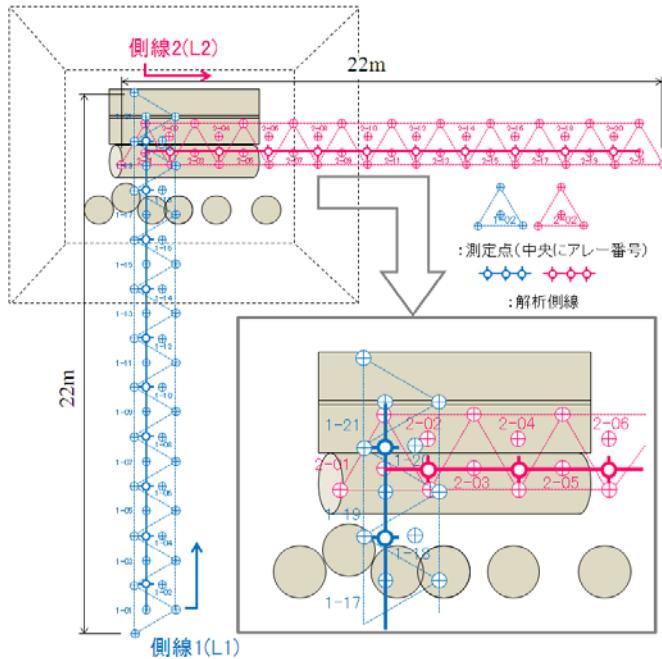


図-6 微動チェーンアレーの受振器配置

Fig.6 Geophone arrangement of the microtremor chain array

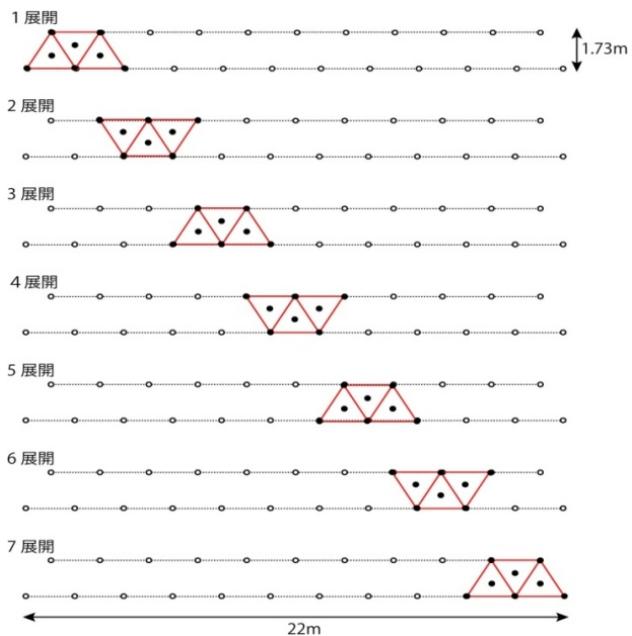


図-7 計測時の受振器ユニット移動

Fig.7 Geophone unit movements at the time of measurements

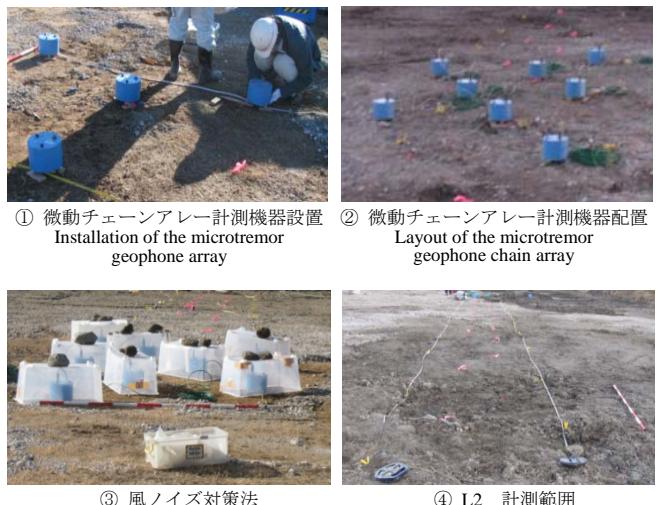


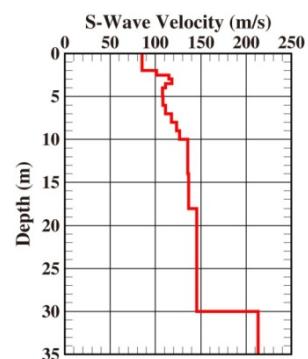
写真-3 微動チェーンアレーの計測機器

Photo 3 Instruments of the microtremor chain array method

6. 解析結果

6.1 S波速度構造初期モデル

初期モデルを与え、観測データを満足するように非線形最小二乗法を用いて、この初期モデルを少しづつ修正し、最終的な結果を得た。本解析で作成した初期モデルは、地表から深度30mまでを20層に分割(固定)し、表層から2mまでは層厚を0.5m、2m~10mは層厚1m、それ以深は順次層厚を大きくした。その初期モデルを図-8に示す。

図-8 S波速度構造初期モデル
Fig.8 Initial model of S-wave velocity structure

6.2 分散曲線の作成

レーリー波の分散曲線は厳密にはP波速度や密度の値にも依存するが、これらのパラメータに対する感度は小さく、多少の誤差があつても解析結果への影響はないと考えられる。そこで、P波速度と密度については、既往の関係式⁶⁾を使ってS波速度から推定した値を与えた。なお、位相速度の計算には、DISPER80⁵⁾を用いた。

6.3 分散曲線と S 波速度構造モデル

図-9 は測線 L1 および L2 の中央に位置する 11 番目の三角形直下の解析結果の例を示している。上図が分散曲線で、「。」でプロットされているのが観測値で、曲線は S 波速度構造モデルから計算した分散曲線である。一方、図-9 の下図は S 波速度構造モデルである。解析データは、L1 測線で 21 個、L2 測線で 21 個、計 42 箇所の S 波速度構造モデルを解析した。

6.4 解析結果とボーリングデータの比較

図-10 に、微動チェーンアレーのデータの解析結果に基づく S 波速度構造のコンター図と地盤改良前のボーリングデータとの比較を示す。太い波線は地層境界を表す。ボーリングデータとしては、左から、深度(m), N 値、岩質とその層厚を記載している。

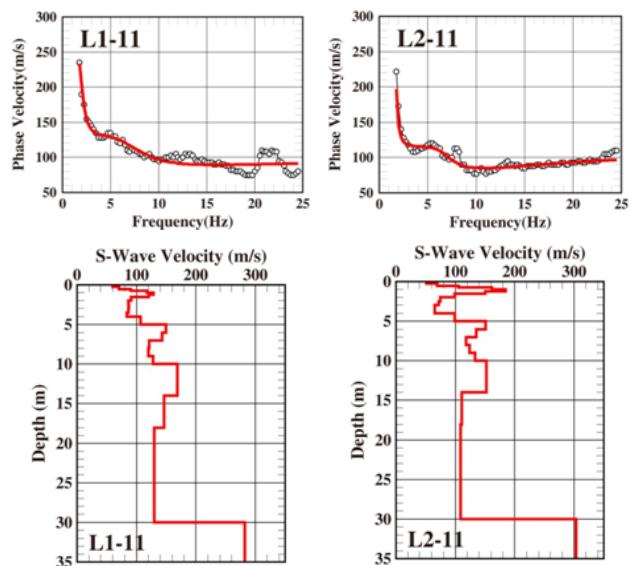


図-9 S 波速度構造モデルと分散曲線
Fig.9 Model of S-wave velocity structures and the corresponding dispersion curves

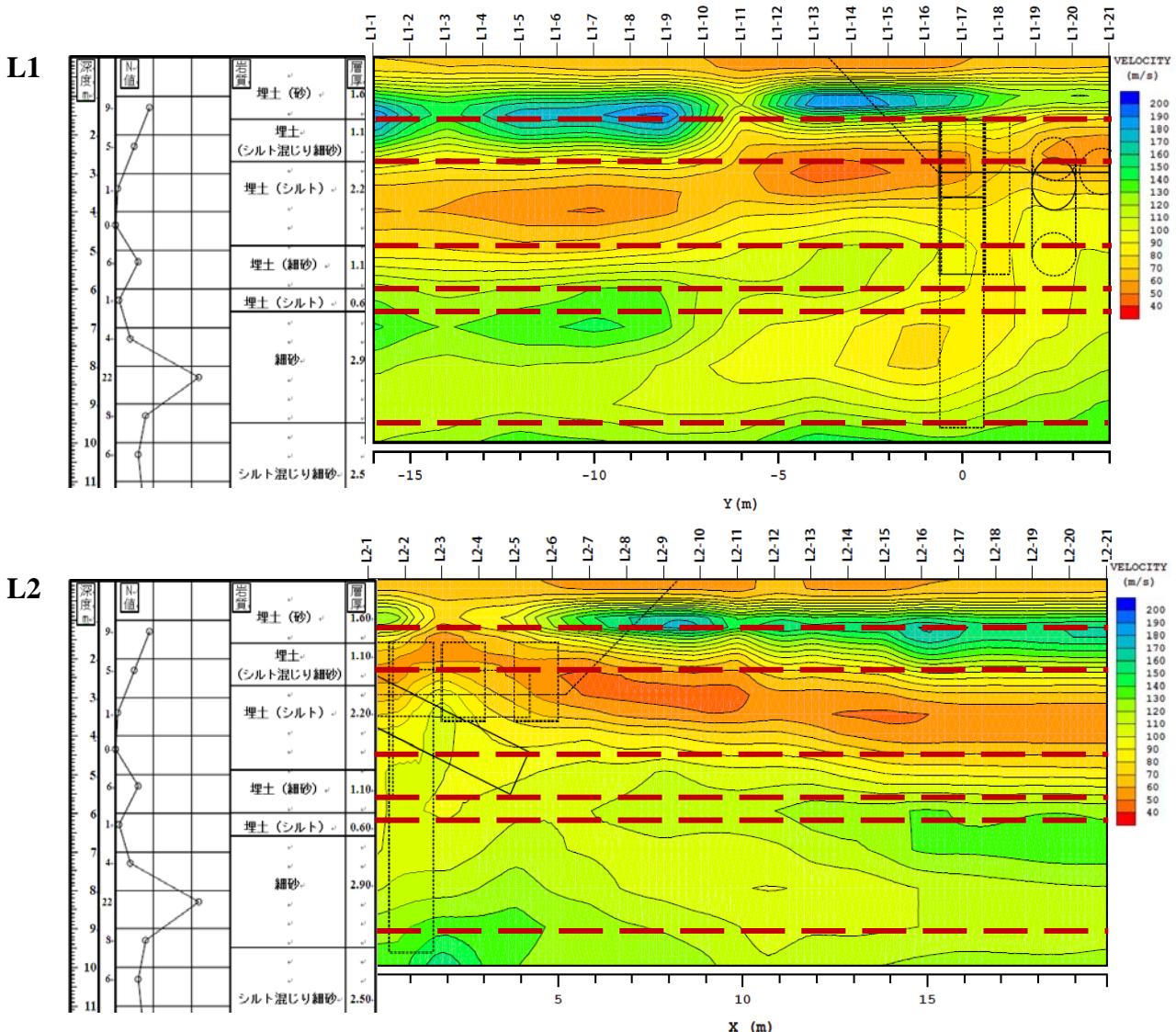


図-10 S 波速度構造（解析結果 L1 および L2）とボーリング・データとの比較
Fig.10 Comparison of drilling data and S-wave velocity structures (results of the analysis : L1 and L2)

7. 考察および結論

前述のように、図-10は、S波速度構造（解析結果L1およびL2）と地盤改良前のボーリング・データとの比較を示している。S波速度は、40～200m/secの範囲で、S波速度としては、通常の岩盤内での速度を考えると1/10程度であり、差は大きくなく、速度の絶対値は信頼性が持てない。したがって、以下では、S波速度の高速・低速に関しては相対的な評価として考察する。まず、ボーリング・データのN値と解析結果を比較する。

図-10のL1測線に関して、L1-1からL1-9までは未改良地盤であり、表層1mを除き、深度1m～2.5mでの高いN値と高いS波速度が対応し、深度2.5m～5.5mの低いN値と低いS波速度が対応し、深度5.5m～10mでの高いN値と高いS波速度が対応していること

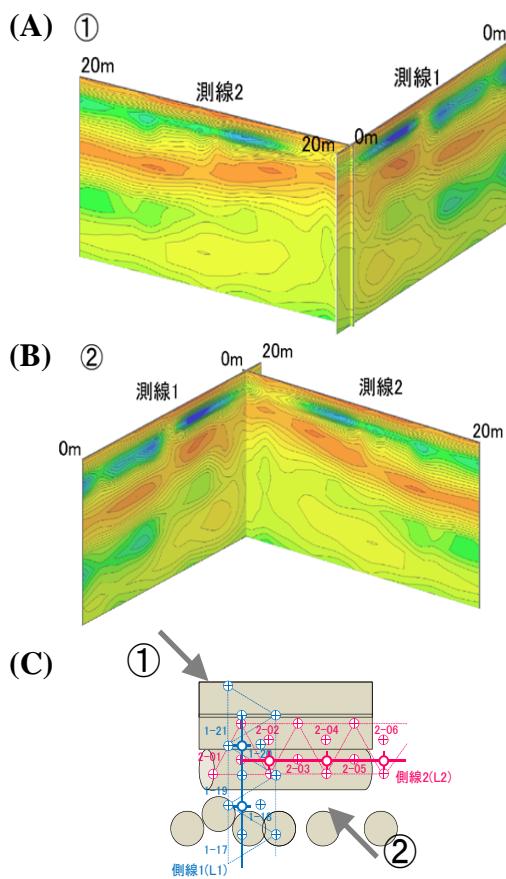


図-11 解析結果のフェンス・ダイアグラム

(A)は、(C)の①方向から見た断面図
(B)は、(C)の②方向から見た断面図

Fig.11 Fence-diagrams of results of the analysis

(A) is a sectional view seen from the direction of C-①
(B) is a sectional view seen from the direction of C-②

が分かる。また、L2測線に関して、L2-12からL2-12は未改良地盤に対応し、L1測線と同じように非常に良い整合性が認められる。

次に、地盤改良部について考察する。図-10のL1測線では、L1-11からL1-21で、L2測線では、L2-1からL2-11である。改良体による地盤改良部では、上記の未改良地盤に存在した低いS波速度部分が少なくなり、測線交差部付近では、表層の軟弱層のS波速度が現れていると考えられる。交差部付近での改良体以深では未改良地盤に存在した低いS波速度分布はなくなり、S波速度は未改良地盤での速度に近い値となっている。

図-11にフェンス・ダイヤグラムを示す。フェンス・ダイヤグラムは、交差する測線で得られた2次元断面での探査結果を、3次元的に表示した図で、探査結果を全体像を空間的に把握する目的のほか、2面の交線でのカラー・センターのズレを評価し解析結果の品質を確認する目的がある。図-11に示したフェンス・ダイヤグラムについて、2つの断面図の交線部分ではカラー・センターの繋がりが滑らかであり、解析データに信頼性が持てる。

8. おわりに

以上の検討を通して、微動チーンアレー法表面波探査は、地表から十数m程度までの浅層地盤調査に有意であると考えられる。今後は、浅層地盤に関する調査を重ね、また、今回は表面波としてレーリー波を用いたが、ラブ波の検討やハイブリッド化、ポスト処理などを検討し、更なる精度向上を考えていきたい。

参考文献

- 長郁夫、多田卓、篠崎祐三：微小アレーによる新しい微動探査法：浅部地盤平均S波速度の簡便推定、物理探査、Vol.61, pp.457-468, 2008.
- 林宏一、平出務、飯場正紀：表面波探査と微動アレー探査による石川県穴水町中心部の地盤構造調査、物理探査、Vol.61, pp.483-498, 2008.
- 泉並良二、深田隆弘、高馬太一：盛土内部緩み域への注入前後における微動アレー探査結果、物理探査学会第128回学術講演会論文集, pp.146-149, 2013.
- Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors, Bull. Earthq. Inst. Univ. Tokyo, Vol.35, pp.415-457, 1957.
- Saito, M. : DISPER80: A subroutine pakage for the calculation of seismic normal mode solutions, Seismological Algorithms, edited by D. J. Doornbos, pp.293-319, Academic Press.