

自然微動を用いた浅部探査

大成建設 正会員 ○今井 博
 大成建設 正会員 青木 智幸
 大成建設 正会員 石井 裕泰

1. はじめに

空洞調査などの地盤調査では地表面から数mから十数m程度を調査する探査技術が要求とされる。しかし、例えば、電磁レーダー法は探査深度が2~3m程度が限界である。S波浅層反射法などを除けば、適当な探査技術は少ない。

そこで、本報では、微動チェーンアレー探査法に着目し、地表面から十数m程度の地盤内部調査法として、起振機を必要とせず受振器のみで行う本探査法の適用実験を行ったので、その結果を報告する。

2. 理論

微動アレー探査では、正三角形の頂点および重心に受振器を設置する。すなわち、観測点は正三角形の円の中心Aと外接円上Bに受振器があることになる(図1)。

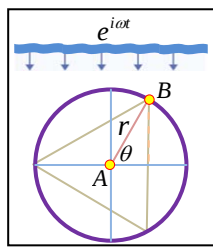


図1 受振点AおよびB

受振器AおよびBについて、表面波 $\exp(i\omega t)$ が観測される場合、時間差 $\Delta t = (r/c)\sin\theta$ を生ずる。ここで、 r は円の半径、 c は表面波の位相速度、 θ は表面波の入射波向と直線 ab が成す角である。ここで、受振点AおよびBで観測される波を $w_A(t)$ および $w_B(t)$ とし、

$$w_A(t) = \exp(i\omega t), \quad w_B(t) = \exp(i\omega(t - (r/c)\sin\theta))$$

と書くことにする。ここで、空間自己相関関数 Φ を、

$$\Phi = \frac{\frac{1}{T} \int_T w_A^*(t) w_B(t) dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_T w_A^*(t) w_A(t) dt} \sqrt{\frac{1}{T} \int_T w_B^*(t) w_B(t) dt}} \quad (1)$$

と定義する。ここで、 $*$ は複素共役を表す。したがって、 $\exp(i\omega t)$ の複素共役は $\exp(-i\omega t)$ であるから、式①の分母は結局1となり、したがって、空間自己相関関数 Φ は

$$\Phi = \exp\left(-i \frac{\omega r}{c} \sin\theta\right)$$

という式となる。ここで、空間自己相関関数 Φ は、

もはや時間の関数ではない。この Φ は、正三角形のアレーの中心にある受振器とその正三角形の外接円上の1点にある受振器との空間自己相関関数 Φ である。ここで、外接円上には他に2点受振点があり、平均化を行うためにベッセル関数に関する公式

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

を用いれば、空間自己相関関数 Φ は

$$\Phi(\omega, r) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \exp\left(-i \frac{\omega r}{c} \sin\theta\right) \right\} d\theta = J_0\left(-\frac{\omega r}{c}\right) = J_0\left(\frac{\omega r}{c}\right)$$

となる。ここで、 J_0 は第1種0次のベッセル関数である。 J_0 は偶関数であり、上式の第3式は第4式と書いても良い。上式を特にSPAC関数と呼ぶ。SPAC関数では、 r は一定であり、角周波数 ω は $\omega = 2\pi f$ で、 f は周波数で、SPAC関数は f と位相速度 c の関数となる。そこで、SPAC関数から周波数 f ごとの位相速度 c を推定し、分散曲線を作成する。インバージョンは、予め作成したS波速度構造のモデルから計算した分散曲線との最小誤差を最小二乗法により計算し、S波速度構造のモデルを更新・確定する。

3. 実験概要

実験位置は、千葉県浦安市運動公園敷地内で、機械攪拌系地盤改良の実験を行った場所である。計測は、受振器8個(3つの三角形、1辺2m)を1つのユニットとして、図2のように測線上を移動し、盛り替え時間も含め、一か所20~30分程度(受振器の固有周期は0.2Hz、計測実時間は512秒)で実施した。

図3に示すように、測線は少々オーバーラップするように、縦方向22mが測線1(L1)、横方向22mが測線2(L2)として実施した。図に測線交差部の拡大図を示す。また、実際の地盤内の地盤改良体と本探査法の2測線との位置関係を示す。

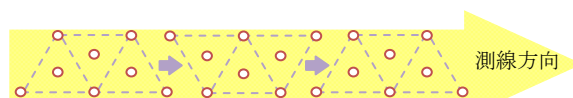


図2 測線での受振器の盛り替え方法

キーワード 自然微動, チェーンアレー, 表面波, 地盤浅部, 分散曲線, S波速度構造

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1 大成建設(株)技術センター TEL:045-814-7236

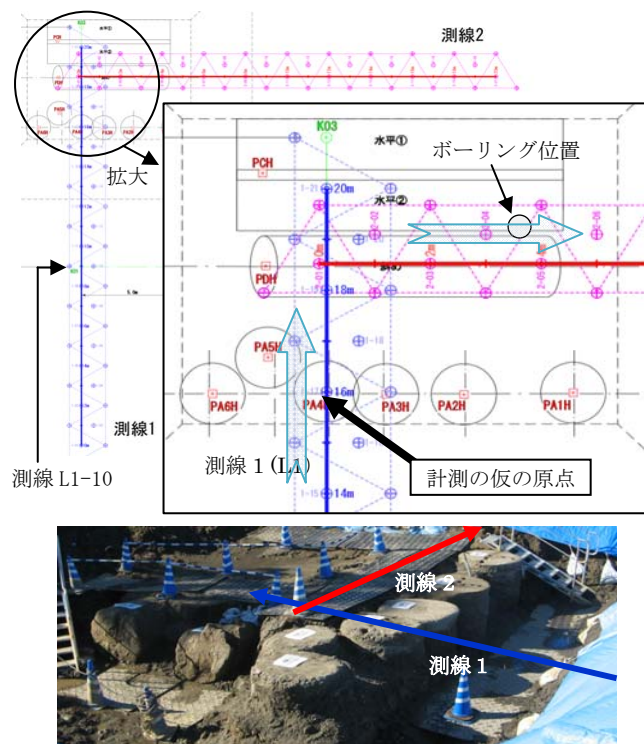


図3 測線の配置と地下構造物の位置 (→は計測方向)

4. 実験結果

図3に示す各測線長は22mで、△が21個ずつある。通常、△ごとに分散測線を作成し、S波構造モデルから計算で最適な表面波の分散曲線を作成することで最適化した短冊状のS波速度構造モデルを推定する。

今回は、全体で誤差を軽減するように、全ての△

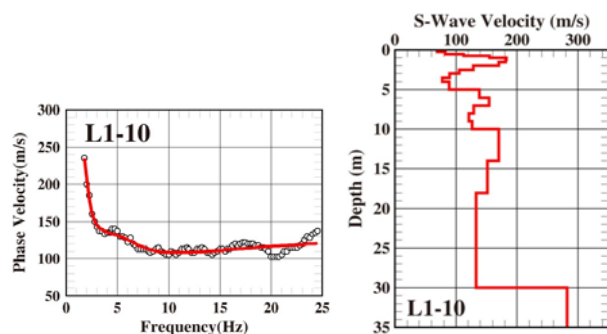


図4 測線1の10番目の位置で得られた分散曲線とS波速度構造

で得られた分散曲線を、統合的に、かつ、最小誤差となるS波速度構造をトモグラフィ的に多点同時解析で求めた。例として、図3に示す→の測線1 (L1-10)で得られた表面波速度分散曲線およびS波速度構造を図4に示す。図5に、測線1(L1)での解析結果と地盤改良前のボーリングとの比較図を示す。未改良部分での、ボーリングのN値の変化とS波速度構造の測線位置-8~-15mと比較すると、N値が高い部分ではS波は速く、N値の低い部分ではS波の遅い部分に対応し、両者は良い整合性を示している。

また、地盤改良部分の上部はS波速度が遅くなっており、埋土が軟弱であったことと良く対応している。測線L2でも同様な結果が得られた。

5. 結論

本探査の地盤改良外部の結果は地盤改良前のボーリングN値や地質区分と、また、地盤改良部での結果は実際の状況と、良い整合性があることが分かった。しかも、地震波屈折法などでは解析不能な軟弱-硬堅-軟弱の互層という複雑な地盤に対して、有意な結果が得られたと考えられる。さらに、今回は、全体で誤差を軽減するように、全ての受振器アレーで得られた分散曲線を、統合的に、かつ、最小誤差となるトモグラフィ的な多点同時解析し、その有効性が確認できた。今後は事例を蓄積し更なる高精度化を考えたい。

謝辞

本報の計測にあたっては、国土交通省の助成事業「平成23年度震災対応型液状化対策技術の開発」、「浦安市が管理する施設を利用した液状化対策工法の実証実験」で取り組む施工実験の場をお借りした。また、本報をまとめるに当たり、ダイヤコンサルタントの杉本氏、ジオアナリシス研究所の凌氏にお世話になった。関係各位のご協力に感謝申し上げます。

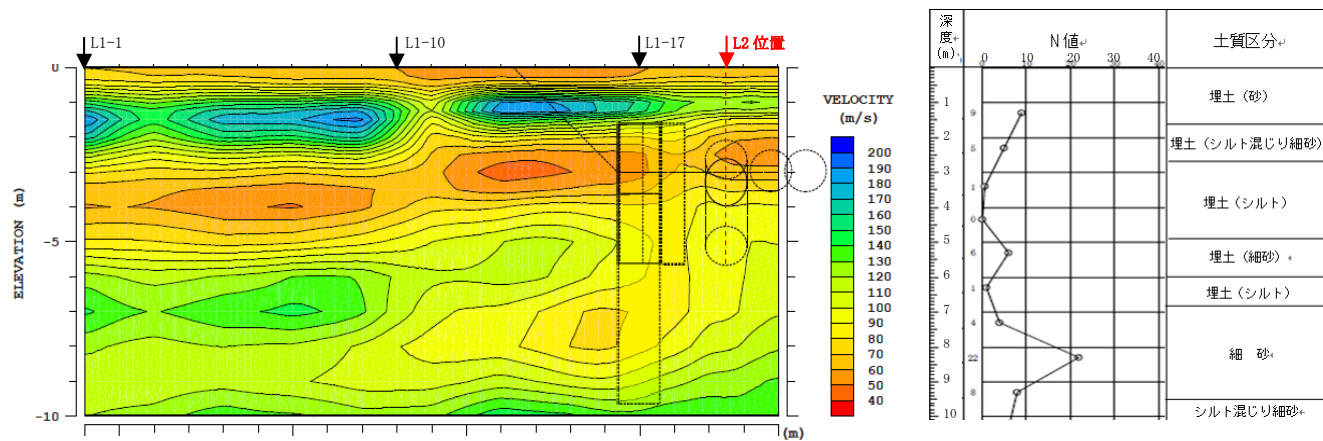


図5 測線1での調査結果 (S速度構造) と事前のボーリング調査 (改良前) 結果