

シングルホール反射法弾性波探査手法の開発

村上 浩次・山本 拓治・白鷺 卓・戸井田 克

正会員 鹿島建設株式会社 技術研究所(〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

E-mail:koji-murakami@kajima.com

著者らは、地下構造を可視化する技術として、直接波による 3 次元孔間弾性波トモグラフィやトンネル切羽前方を対象とした反射法弾性波探査の開発を行ってきた。新たに開発したシングルホール反射法弾性波探査は、一本のボーリング孔内から発振を行い、地質境界面からの反射波を同一孔内に設置した複数の受振器で記録し、周辺に存在する地質境界の推定を行う探査手法である。今回、軟岩サイトにおいて性能確認のための試験探査を行った。既実施の孔間弾性波トモグラフィ探査結果との比較から、本手法が有効であることが確認できたので報告する。

Key Words: *single bore hole, seismic reflection survey, cross hole tomography, electromagnetic tomography*

1 はじめに

都市部の地中線形構造物の建設では、設計図面に記載されていない地中埋設物や、想定外の地質の出現が施工の進行に与える影響は大きい。また、注入等による地盤改良や空隙の充填においても、施工終了後に改良範囲、充填性を直接的に確認することが難しく、施工時に注入量や注入圧といった間接的な指標によって管理しているのが一般的である。そのため、施工時にはそれらの指標を満たしていたにもかかわらず、実際に改良や充填が不完全であれば、その後の事故を誘発する恐れがある。

以上のような問題を解決する手段として、ボーリングによって地中の状況を直接確認することも可能ではあるが、工期、工費、用地の問題による制約が大きい。そこで、できるだけ少ない本数のボーリング孔で地中をイメージングする技術の開発が望まれている。地中を対象とした物理探査手法には、使用する波動の種類、発信点と受信点のレイアウトの違い等で、様々な手法が存在する。2 本以上のボーリング孔を利用した探査手法について、著者らはこれまでに孔間弾性波トモグラフィ探査手法を開発し、いくつかの現場で適用してきた。この手法は、孔間

を伝播する弾性波から、詳細な地盤構造を検出することが可能である反面、2 本以上のボーリング孔が必須のため、都市部での探査では地上構造物の制約を受けるなどの理由で実施できない場合がある。また単一のボーリング孔を利用する探査手法も、これまでいくつか開発され、実際に適用されてきた。その主なものとして、速度検層やボアホールレーダ反射法等がある。前者は、ボーリング孔壁面に沿った地盤の弾性波速度分布を詳細に把握することができるが、ボーリング孔から離れたところに存在する地質境界面や地中構造物を検出することはできない。また、ボアホールレーダー反射法は、孔内から電磁パルス波を発信し、その反射波を受信することで、孔周辺に存在する地質境界や地中構造物を検出することが可能であるが、探査可能な領域が孔から数 m と小さく、限られた条件での適用となる。

以上のような背景から、「(1)単一のボーリング孔しか利用しない、もしくはできない現場での適用」、「(2)詳細な弾性波速度の分布ではなく、弾性波速度が変化する境界面の検出」、「(3)短い時間でできる探査」の 3 点に絞った技術として、シングルホール反射法弾性波探査手法の開発を行うこととした。

2 探査手法の概要

(1) 探査原理

本手法は、図-1 に示すように、孔内外で発生させた弾性波が、地質境界面や、地中構造物によって反射され戻ってきたところを、孔内に設置した受振器で収録することで、それらの境界面などの位置を特定する探査技術である。

本手法の原理は、反射法によるトンネル切羽前方探査の原理と、基本的には同一である。探査時に記録された、発振点と受振点間の距離と直接波の走時から、2 点間の地盤の平均弾性波速度が求まる。これら受振点と発振点とはともに多数有り、全ての組み合わせの弾性波速度から、孔周辺の地盤の平均弾性波速度を算出する。本手法では、特段の場合を除き、孔を含む解析領域内では、その平均弾性波速度が様に分布していると仮定する。そして、直接波の後に収録された反射波の走時から、発振点→反射面→受振点の距離である反射波線経路長を求める。反射面は、発振点と受振点をそれぞれ焦点とし、反射波線経路長によって導かれる楕円球面によって表すことができる。多くの発振点-受振点の組み合わせによる楕円球面が重なる位置を、地質境界面として評価する。本手法では、受振点は基本的に孔内に限られるが、発振点は孔内だけでなく、地表面上にも設定することができる。これにより、いくつかの楕円球の長軸がボーリングの線形からずれるため、軸対称性を回避し、境界面までの距離だけでなく、方向も推定できる。解析方法の詳細は後述する。

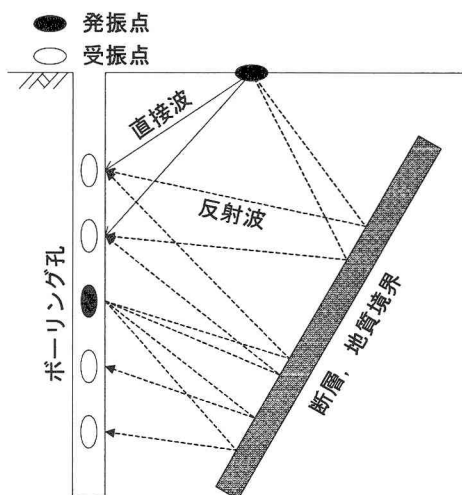


図-1 探査手法概略

(2) 探査機器

探査に使用する機器として図-2 に電磁制御式発振器、図-3 に孔内受振器、図-4 に波形収録装置(サイスモグラフ)を示す。

電磁制御式発振器のコア部は超磁歪性の金属でできており、電流を流すことによって、本体自身が収縮と引張を繰り返して地盤に振動を与える。電流の方向と強さを制御することで、図-5 のように入力波形の周波数、振幅を任意に設定することができるため、従来の発破等による発振に比べて、ノイズの影響を低減した、より精度の高い探査が可能である。また、本装置はその構造から、P 波に比べて地中で

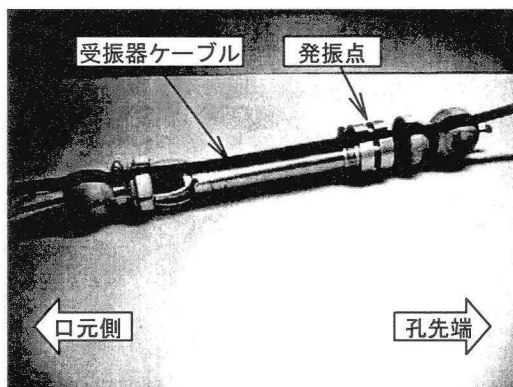


図-2 電磁制御式発振器



図-3 孔内受振器

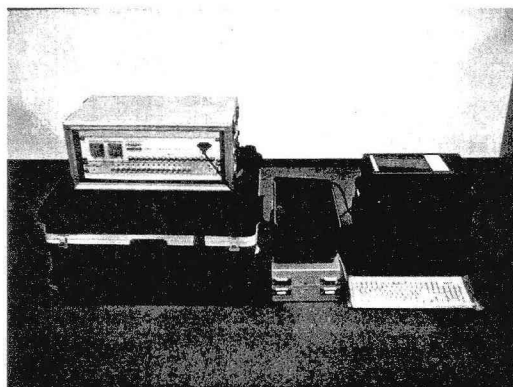


図-4 波形収録器(地震計)一式

の減衰が少なく、分解能の高いS波を卓越させて発生することが可能である。孔内受振器は、いわゆるハイドロフォンであり、全長50mのケーブルの先端から、12個のセンサーが2mずつ等間隔に設置されている。電磁制御式発振器は、通常、図のようにハイドロフォンのセンサー間のケーブルに沿わせながら使用する。探査可能なボーリング孔の径は、現在の仕様では、66mm以上である。

(3) 計測方法

図-6に示すように、12連式のハイドロフォンの任意の受振点間に発振器を添えて両方を孔内に挿入す

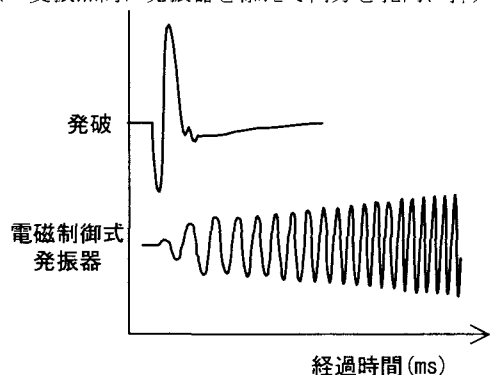


図-5 入力波形例

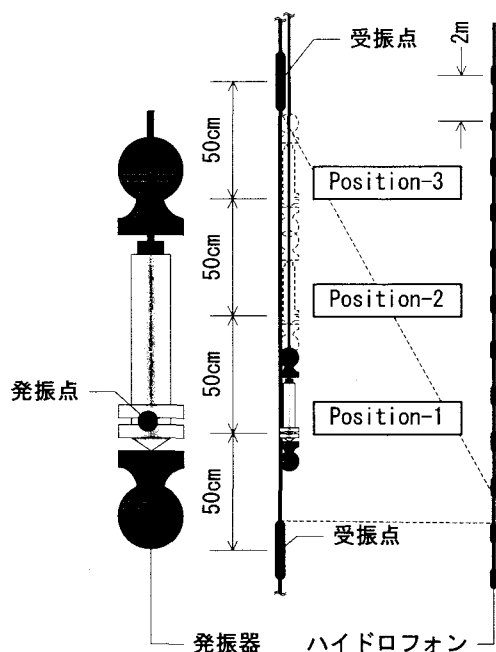


図-6 計測手順概略

る。目的の位置までハイドロフォンを降下させた後、あらかじめ設定しておいた波形で、地盤中に弾性波を発生させる。地盤条件によっても異なるが、1箇所5~10回程度スタッキング(重合処理)を行いS/Nの向上を図る。受振センサー間の距離は2mあり、図のように、最初はPosition1で発振を行い、次に発振器のみ50cm引き上げPosition2で発振を行う。同様にPosition3でも発振するので、計3箇所が発振することになる。Position3での発振が終了すれば、次にハイドロフォンのみを1m引き上げ、発振器の位置を相対的にPosition1に戻す。以後は上記の作業を、発振器が探査範囲上端に到達するまで続ける。孔内での発振の後には、発振器を地表面に押し当てて、数箇所から発振を行う。

(4) 解析方法

解析は図-7のフローに従って実施する。現場で採取されたデータを波形収録装置から読み込む。また、すべての発受振点の座標を入力する。(①)

次に、解析対象範囲と要素数(節点間隔)を設定し、(②)。採取された波形の直接波の初動をピックし、発受振点間の平均地山弾性波速度を計算する(③)。地山弾性波速度は直接波の伝播時間と発受振点間の距離から計算される。求められた地山弾性波速度を利用して、解析対象範囲の初期弾性波速度モデルを構築する(④)。

次に、波動の伝播時間に対応する減衰を計算して減衰波形を増幅し、次に波形をスペクトル分析し、

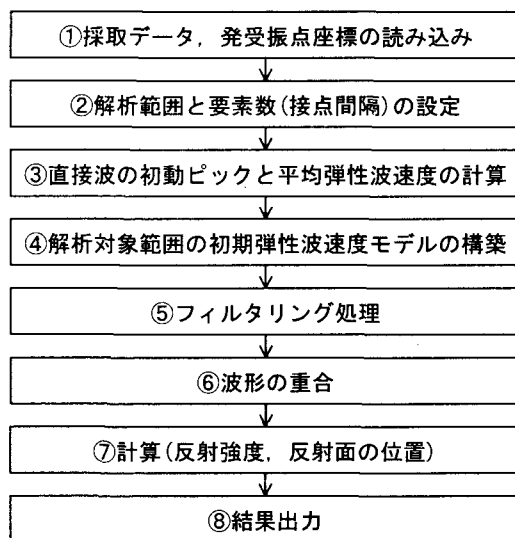


図-7 解析フロー

ノイズ等の不要な周波数帯域の波形を除去する。フィルタリング処理では、到達時間に応じた減衰反射波の強調を行う時間フィルタと、電気パルス等のノイズ成分を除去し、反射波のみを抽出するための周波数フィルタ、及び直接波を抑制するための弾性波速度フィルタの3種類のフィルタを用いている(⑤)。図-8にフィルタリング処理の画面を、図-9にフィルタリング処理によって得られた補正波形を示す。

次に、反射面までの到達時間を算出し、発受振点間の距離の差による走時を補正してそれらを重合することで、反射面の位置を推定する(⑥)。

④で得られた初期弾性波速度モデル上において、抽出された反射波から反射面の位置と各節点の反射強度を計算する(⑦)。

ここで反射強度とは、受振した反射波の振幅と発振波の振幅の比を-1から+1までの範囲で正規化したものであり、反射面の反射係数に比例するものとみなすことができる。反射係数の式を式(1)に示す。

$$R = (\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1) / (\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1) \quad (1)$$

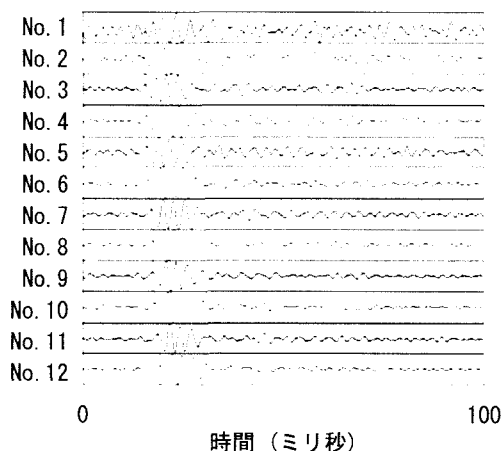


図-8 収録波形(補正後)

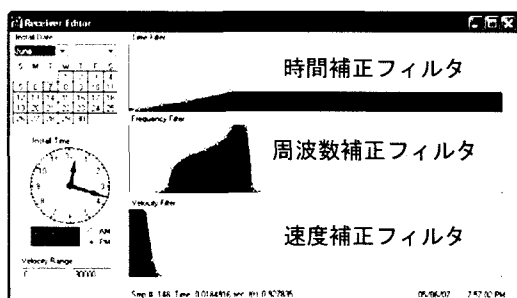


図-9 形フィルタ処理ウィンドウ

ただし、 R は反射係数、 ρ_1 、 ρ_2 は媒質1、2の密度、 V_1 、 V_2 は媒質1、2の弾性波速度、 $\rho_1 V_1$ 、 $\rho_2 V_2$ は媒質1、2の音響インピーダンスである。

たとえば、媒質1から媒質2へと弾性波が伝播するとき、媒質2が媒質1より硬い場合は、両媒質の境界での反射波の反射係数は正となり、媒質2が媒質1より軟らかい場合は、両媒質の境界での反射波の反射係数は負となる。また、媒質1と媒質2の硬軟の差が大きい、つまり、地質の変化が大きいほど反射係数の絶対値は大きくなる。得られた結果は妥当性を分析後、必要であれば再び②以降の作業を繰り返す。

3 軟岩サイトでの原位置試験

(1) サイトの概要

本探査手法の性能を確認するために、原位置試験を行った。試験サイトのレイアウトを図-10に示す。ここでは、4本のボーリング孔を削孔しており、それらの孔を利用して、過去に孔間弾性波トモグラフィ、電磁波トモグラフィを実施した。4本のボーリング孔はNo.1-No.2-No.3間がそれぞれ5m、No.3-No.4間が8mで、ほぼ直線的に並んでいる。また、本サイトの地質は、第三系の砂岩泥岩互層で薄い礫岩層を挟在している。地層の走向は、孔の配列方向にほ

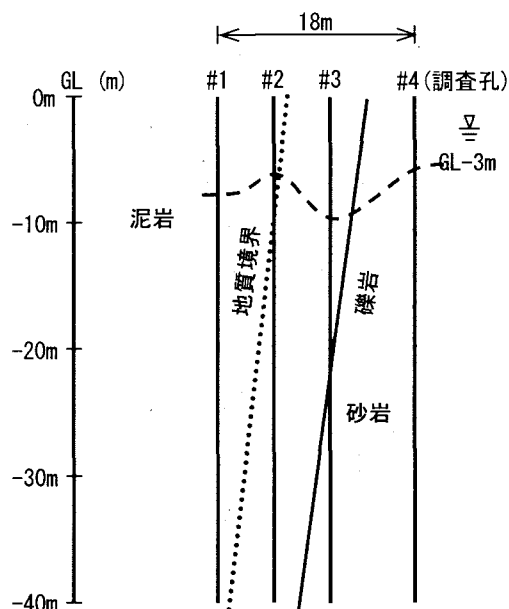


図-10 探査サイト概略

ほぼ直行し、また傾斜は 70～80° と高角である。No.1 孔側で泥岩優勢層が、No.4 孔側で砂岩優勢層が分布している。削孔はコアボーリングで行ったが、微小な亀裂が多く入っており、全区間にわたって健全なコアを採取することは困難であった。なお、今回の試験は No.4 孔を調査孔にして、砂岩-泥岩の地質境界の検出を目的に行った。

(2) 試験結果

解析によって得られた結果を図-11 に示す。比較のため、弾性波トモグラフィによる探査結果、電磁波トモグラフィによる探査結果、また以上の 2 つの結果とボーリング結果から得られた、地質の概略図を併記する。今回のシングルホール反射法弾性波探査の解析結果と地質概略図を比較すると、地質概略図で礫岩が貫入している No.3 孔付近から、No.2 孔付近の泥岩との境界部までの砂岩領域で、多数の反射面が集中して検出されていることがわかる。一方の泥岩部にはほとんど反射面は検出されていない。この理由として、礫岩の貫入部から砂岩-泥岩の境界面に近づくにつれて、弾性波速度が段階的に変化しているため、たくさんの反射面が検出されたものと考えられる。一方、反射面が検出されなかった泥岩部では比較的一様な弾性波速度の分布になっていると

みなすことができる。砂岩-泥岩の境界を反射面の有無による境界とすると、電磁波トモグラフィで検出された、電磁伝播速度の境界とがほぼ重なっていることが分かる。

4 まとめ

反射法によるトンネル切羽前方探査技術を応用し、地盤中に削孔された一本のボーリング孔で、発振と受振の両方を行うシングルホール反射法弾性波探査手法の開発を行い、軟岩サイトで、実証試験を行った。その結果、既知のボーリング結果や孔間弾性波トモグラフィ、また電磁波トモグラフィで得られた地質構造の情報の非常に近い結果を得ることができた。本技術は、地盤情報の中の地質境界面位置を簡易に検出することを目的としていることから、今回の探査ではその目的に見合った成果を得ることができたといえる。ただ、現時点では適用件数が少ないため、探査位置の地盤条件と探査範囲、探査対象の関係が、正確に判断することが難しい。今後は、探査実績を増やし、適用条件とその限界を把握することに努め、実際の施工現場で迅速かつ正確な探査が行えるようにする必要がある。またそれと平行して、

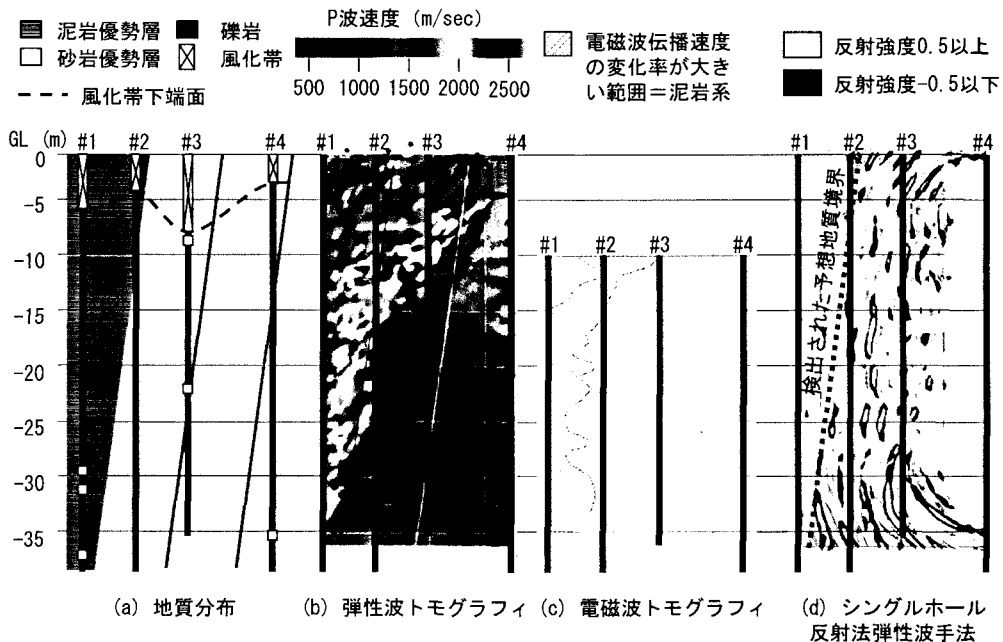


図-11 解析結果

多様な地盤でも探査できるように，発振器と受振器をはじめとする探査機器の改良を行っていく所存である。

参考文献

- 1) 白鷺卓，山本拓治，西岡和則，青木謙治；反射トモグラフィを利用したトンネル周辺地質の予測，第 11 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集
- 2) 白鷺卓，山本拓治；堆積軟岩を対象とした三次元孔間弾性波トモグラフィの適用性の検討，土木学会年次講演会講演概要集，Vol.59, pp.819-820. 2004
- 3) 山本拓治，白鷺卓，富田諭，青木謙治；三次元孔間弾性波トモグラフィによるグラウト効果の評価，第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.203-209, 2003
- 4) 升元一彦，須山泰宏，戸井田克；周波数可変方式電磁波トモグラフィによる堆積岩の透水性構造調査，第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.306-310, 2001

DEVELOPMENT OF SINGLE HOLE SEISMIC REFLECTION SURVEY METHOD

Koji MURAKAMI, Takuji YAMAMOTO, Suguru SHIRASAGI, Masaru TOIDA

The authors have developed three dimensional cross hole tomography survey method using direct wave and seismic reflection survey for ahead of a tunnel face. Single hole seismic reflection survey method requires just one hole for generating waves and for receiving them. The purpose of this method is to detect geological anomalies and boundaries around a bore hole. In many cases, drilling some holes are difficult because of its cost or geographical problem. In such a site, it's possible to survey with this method. And this method can lead not only the distance between a bore hole and an anomaly but also the direction. The examination survey has been executed for performance confirmation in a soft rock site. A cross hole seismic tomography survey and an electromagnetic tomography survey had been held there. This paper describes the theory of this survey method and the results of the examination.