

2. 調査方法

2-1. 弾性波探査

(1) 原理

弾性波探査とは地盤内を伝わる弾性波（振動）の内、P 波（縦波）とよばれる最初に到達する波を利用して地層内の速度構造を解析し、それにより地層構造を把握するものである。

想定する地下構造の解析法としては、従来行われている速度層構造としての萩原の方法（ハギトリ法）、近年電算処理の発達により可能になった速度セル構造としてのトモグラフィー法がある。速度層構造では速度層が水平方向に層状に分布することを前提とするものである。速度セル構造としてはほぼ四方セルがそれぞれ速度値をもつものの集まりを前提とするものである。

今回の業務では、両方の解析法を用いて、地山の弾性特性を把握した。

図 2-1-1 に弾性波探査結果のイメージ図を示す。

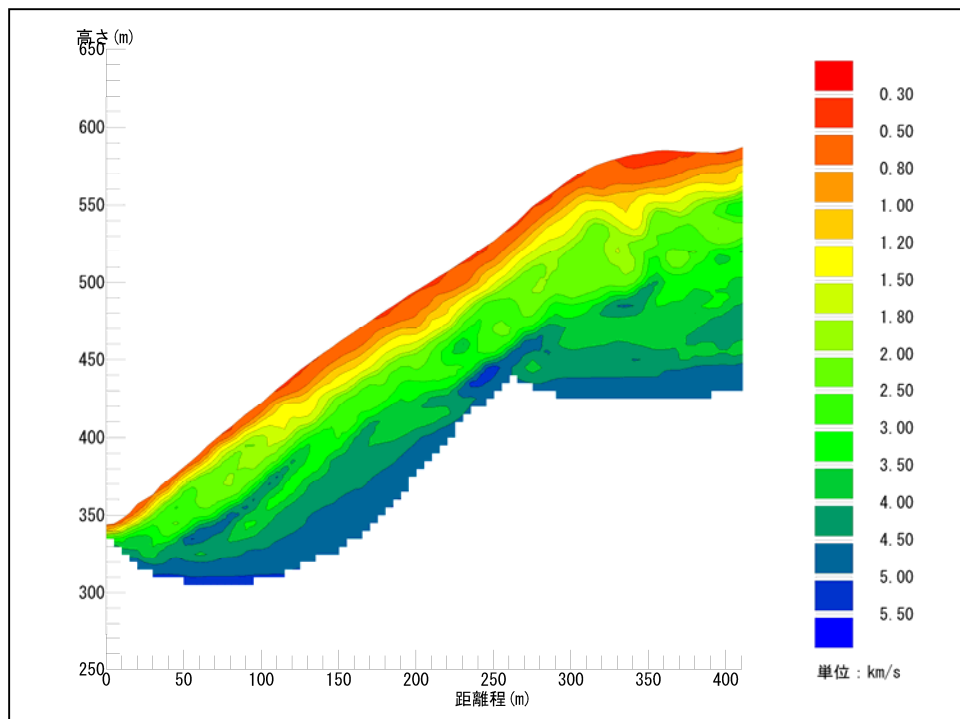


図 2-1-1. 弾性波探査結果イメージ図

※：計画地の状況を示すものではありません。

(2) 探査方法

実際の方法は、地表付近で人工的に発生させた弾性波が地層中を伝わる状況を地表に設置した受振器で測定した。

図 2-1-2 に弾性波探査の測定概念図を示す。

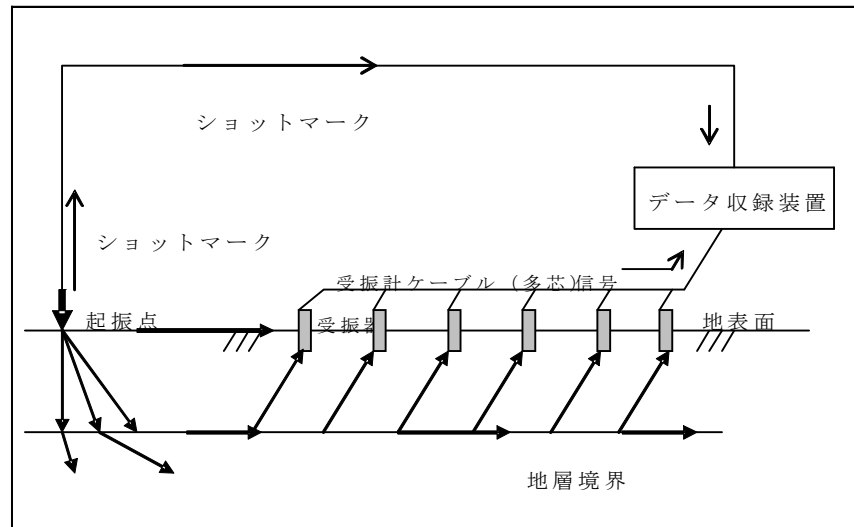


図 2-1-2. 弾性波探査測定概念図

観測記録の読み取りにより、弾性波が起振点から受振点まで伝播する時間が求められるので、起振点と受振点の位置をいろいろ組み合わせて測定した結果（弾性波伝播速度）をまとめて走時曲線を作成した（図 2-1-3）。

走時曲線は、横軸に起振点から受振点までの距離をとり、縦軸に時間をとって測定結果をプロットしたものである。この走時曲線を解析して弾性波速度に関する地下構造の断面図（速度層断面図）を作成した。

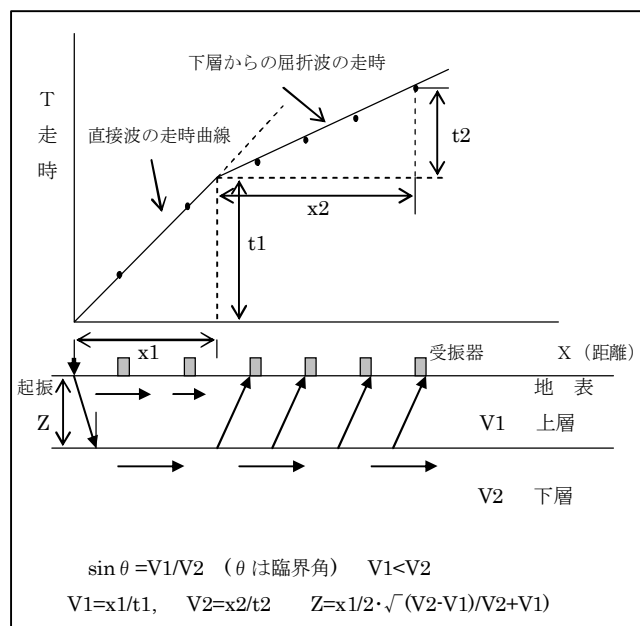


図 2-1-3. 水平 2 層構造の走時曲線

(3) 解析方法

1) 萩原の方法（ハギトリ法）

実際の解析作業においてはまず走時曲線を各速度層の走時に分け、同一区間で同一速度層の走時に相当する部分があるかを調べる。

該当する部分について $T'_{AR} = T_{AR} - T_{DR}$ を各点で求める。

$$\begin{aligned} T_{AR}' &= T_{AR} - T_{DR} \\ &= T_{AR} - \frac{T_{AR} + T_{BR} - T_{AB}}{2} = \frac{T_{AR}}{2} - \frac{T_{BR}}{2} + \frac{T_{AB}}{2} \\ &= \left(\frac{T_{AR} - T_{BR}}{2} \right) + \frac{T_{AB}}{2} \end{aligned}$$

上記より、図 2-1-4 のように図的に解析できる。すなわち全走時 T_{AB} の $1/2$ の位置に直線を引き、 T_{AR} と T_{BR} との差の $1/2$ をこの線の上下に足し引きすればよい。 T_{AR}' と T_{BR}' とは逆からみたことになる。

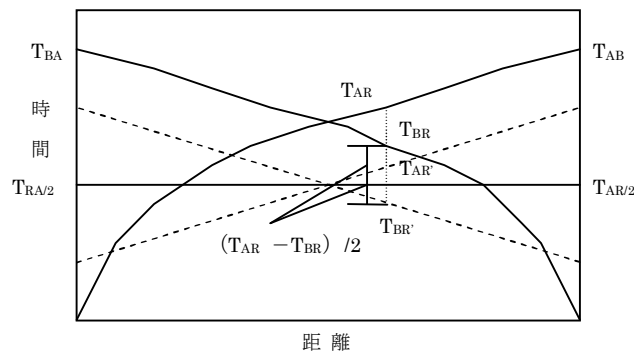


図 2-1-4. 速度層の図的解析

ハギトリ点にある間隔で平均的に結んだハギトリ線は、傾きがその部分の速度を示し、これらのハギトリ線の間に段差を生じる部分は低速度部分を示す。速度の違う層を通った走時曲線同士でのハギトリでは真の速度を得ることが出来ないので、測定では出来る限り展開の外側から起振を行う。これを遠隔起振と呼び、これは測線全体の最下層のハギトリを行うためである。

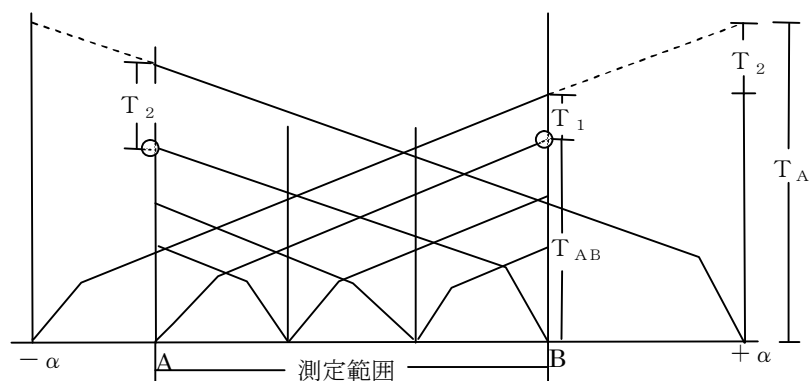


図 2-1-5. 全走時の求め方

図 2-1-5 より、 T_1 は $-\alpha$ と A 間の最下層の伝播に要した時間であり、 T_2 は B と $+\alpha$ 間に要した時間である。したがって $-\alpha$ と $+\alpha$ 間の全走時 T_A は、

$$T_A = T_{AB} + T_1 + T_2$$

となり、両遠隔起振においても全走時を求めることができハギトリ解析が出来る。

最下層同士の走時によりハギトリ線と走時との差は、上部の全層の深度走時を足したものである。一つ上の層同士のハギトリより速度と深度走時、またその上と順に出していけば各層の速度を得ると同時にこの深度走時を順に分割できる。

ハギトリ出来ない部分では 2 平行層の場合の方法を用いる。このような操作はかならずしも全区間で行えるものではないが、行えた部分より全体を推測し深度走時を各層に分割することとなる。分割した後、各層の厚さは下式で求め、断面図地表面から上層より順に円弧を書き、包絡線を作り層境界線とした。

$$Z_1 = \frac{T_1 V_1}{\cos \left(a \sin \left(\frac{V_1}{V_L} \right) \right)}$$

V_L : 最下層速度 $Z_1 : T_1 : V_1$ 1 番目 層厚 : 走時 : 速度

この様な操作により速度層断面図を作成した。

2) 高密度解析（トモグラフィー法）

この方法は解析をコンピューターより行う方法である。残差（測定値と計算値の差）の変化がほとんど無くなるまで繰り返し計算し収束させた。

以下に各手法による解析作業の流れを図 2-1-6 に示す。

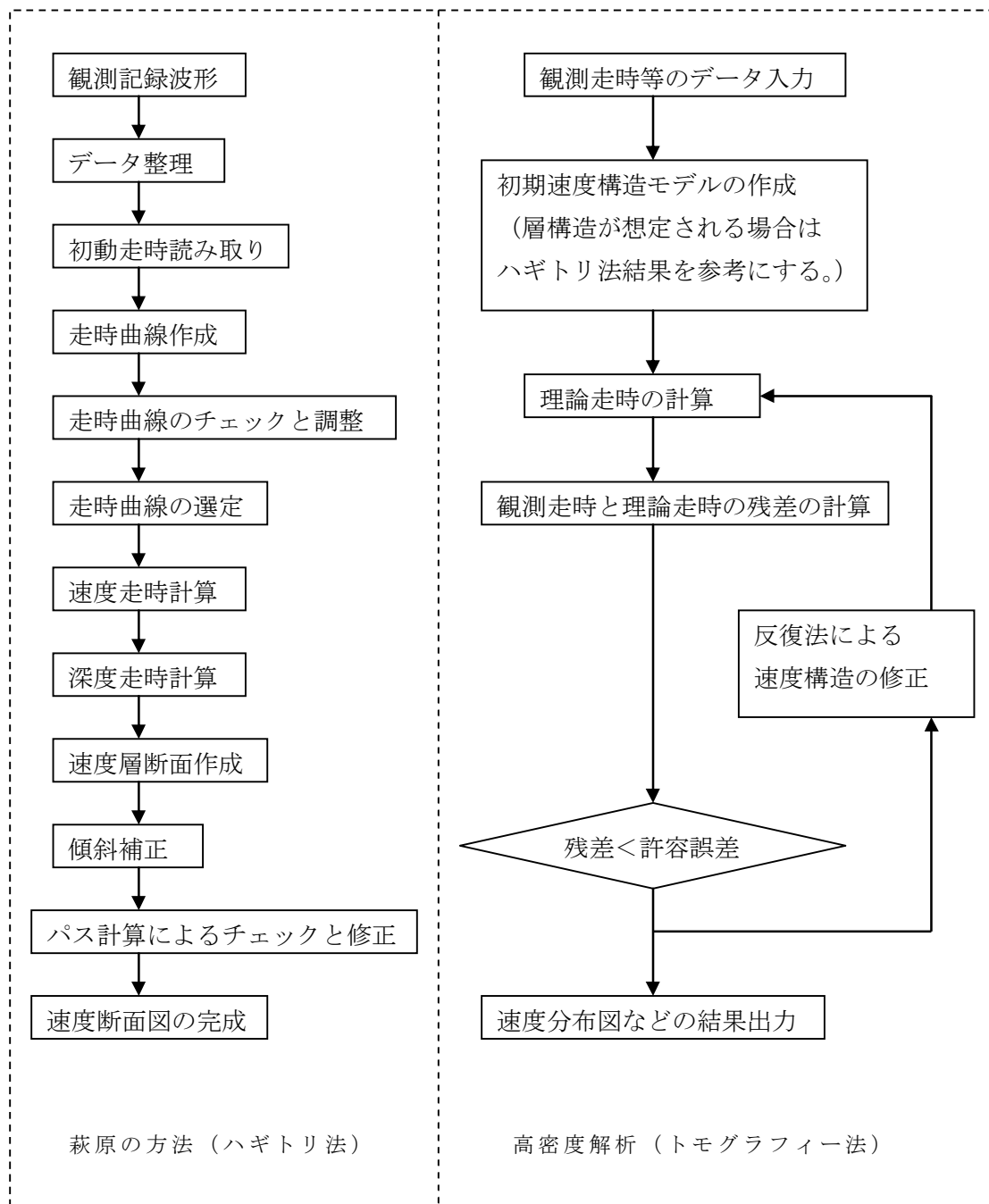


図 2-1-6. 解析作業の流れ図

記録より読み取った初動値を走時曲線とし両起振点における終端走時の一致を計る。そして地表標高値より断面図を作成する。この断面図の下に水平距離測定間隔、厚さ 0.5～数mの深いほど厚く又速度の速くなるようなモデルを作成する。このモデルに対し各起振点より各受振点までの振動到達時間を、様々な経路に沿って計算する。これをパス計算と言う。

パス計算の内最小時間のものを全起振点、全受振点について算出し、これと実際に観測された各々のデータとを比較し、その違いの傾向（残差）によりそれぞれのセルの速度値を替え、さらにパス計算を行う。この様な操作を何度も繰り返すことにより、より真実の構造に近づけることが出来る。

■ パス計算について

速度構造モデルを図 2-1-7 のように複数の四辺計（セル）の並んだものに近似し、各セル内の弾性波速度は一定とする。各セルの周辺（速度境界線）に複数の節点を設定する。起振点より射出された波線は、これらの節点をたどるものとし初動走時はこれらの節点をたどる経路の内最も走時の短い経路の走時とする。

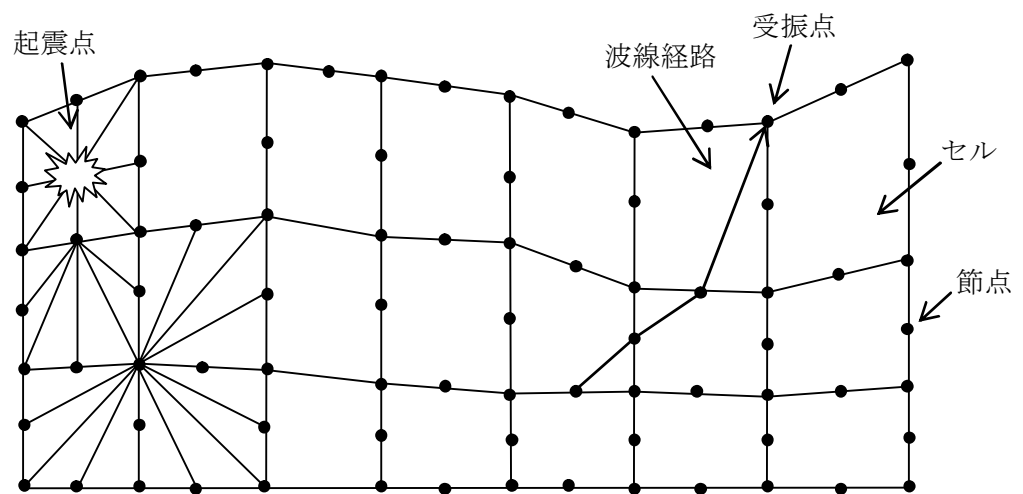


図 2-1-7. 速度層の構造モデル

実際の計算方法は次の通りである（節点が 24 点の場合）。

図 2-1-8 のように V 1 層内で起振した場合、起振点からその起振点が存在するセル周辺上の 24 の節点までの走時を計算し、計算した 24 節点までの走時及び経路は記憶しておく。

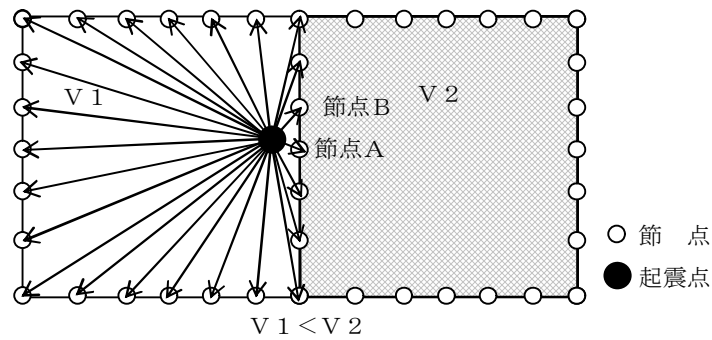


図 2-1-8. 24 節点までの走時計算

計算された 24 の走時から最も速い走時を選びその節点（この場合節点 A）から、その節点
が属する全てのセルの全節点までの走時を計算する。ここで、節点 A では、これ以上走時の
速い経路は考えられないので、節点 A までの経路、走時は計算できたと考える（図 2-1-9 を
参照）。

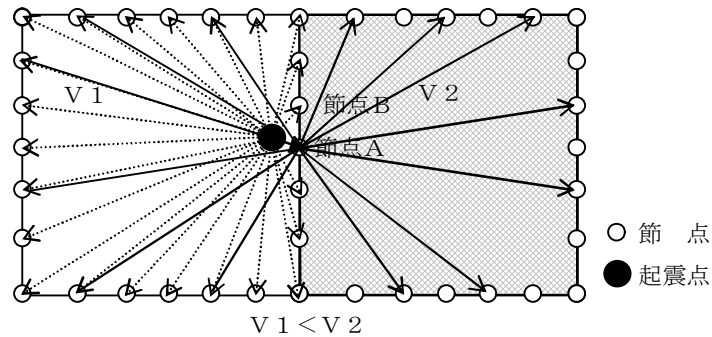


図 2-1-9. 節点 A の走時の計算

節点 A から計算をおこなった全節点のうち、2 つ以上の走時が計算された節点（例えば B
点）においては、速い方の走時を選択し記憶しておく。以上走時の計算を行った全節点の中
から最も速い走時を選択し、その節点 B からその節点が属する全てのセルの全節点までの走
時を計算する。ここで、節点 B では、これ以上走時の速い経路は考えられないので、節点 B
までの経路及び走時は計算できたと考えられる（図 2-1-10 を参照）。

以上のような計算を全ての節点での計算が終わるまで繰り返す。

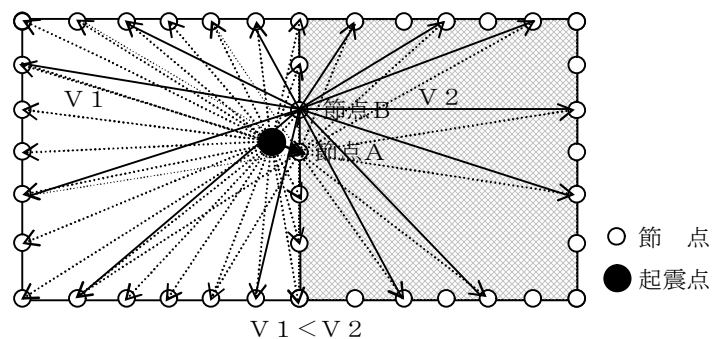


図 2-1-10. 節点 B の走時の計算

(4) 解析結果の特徴

1) 萩原の方法（ハギトリ法）

1. 速度は上部より下部に向かい速くなる速度層構造で層厚も下部ほど厚い必要がある。
2. 速度層境界の起伏は小さい必要がある。
3. 速度層区分で解釈、利用がしやすい。
4. 凸型地形では中心部の情報が得られにくい。
5. ハギトリ線の傾きより速度と低速度帯の位置が分かる。
6. 同じ速度層を通った臨界屈折波走時同士でハギトリする必要がある。

2) 高密度解析（トモグラフィー法）

1. 速度は上部より下部に向かい徐々に速くなる層構造として考えるが速度の逆転にもある程度対応出来る。
2. 速度の構造が複雑でもある程度対応できる。
3. 計算上は分割された速度値を持つユニットでおこなうが特定の速度層に変換できる。
4. 凸型地形では全域を測定することにより中心部の解析も可能である。

以上、両解析法の得失を踏まえ、本業務では両方の解析を実施し、精度向上をはかった。

2-2. 高密度電気探査（比抵抗法 2 次元探査）

(1) 原理

高密度電気探査は地盤を構成している土、岩石の電気的性質の差異に着目して、人工または自然的要因によって発生した電界あるいは電磁界の諸量を地表で測定し、そのデータから地下の構造や状態を推定する方法である。

土木関係の探査では人工的に発生させる物理現象を利用する比抵抗法が主として用いられる。

今回の業務では、比抵抗法（比抵抗法 2 次元探査）を用いて比抵抗分布から、弾性波探査結果と併せ地下構造を推定した。

図2-2-1に、比抵抗法 2 次元探査結果のイメージ図を示す。

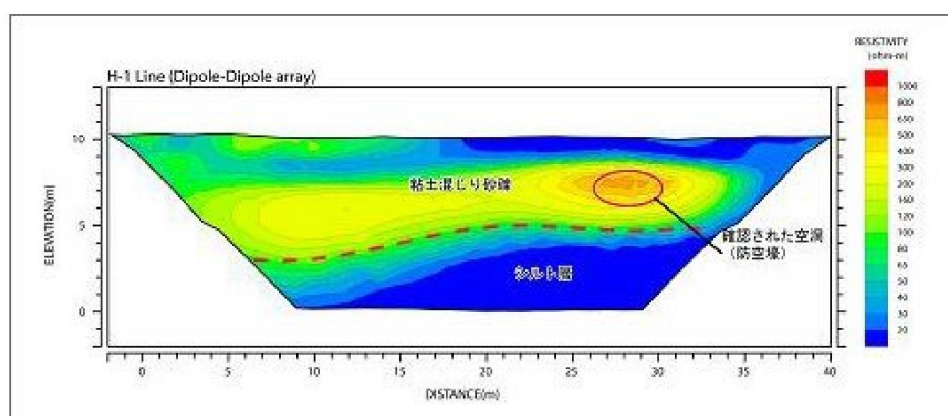


図2-2-1. 比抵抗法 2 次元探査結果のイメージ図

※：計画地の状況を示すものではありません。

(2) 比抵抗法 2 次元探査

比抵抗法 2 次元探査は、ある地点の地下の深さ方向の比抵抗分布を調査する方法であり、大地に直流電流を流し、それにより形成される電位から地下の比抵抗分布を解析する。

地層は岩石を構成する鉱物の種類、鉱物粒子間の孔隙を満たす水のイオン濃度や量、あるいは温度などによって、異なった比抵抗を持っているので、比抵抗分布から地下構造を推定することができる。

図2-2-2に測定概念図を示す。

図2-2-2に示す様に、2本の電流電極で電流（I）を地下に流し、2本の電位電極で電流を流したために生じる電位（V）を測定する。なお、電極は測点Oを中心にして、測線上に対称に配置する。

実際の測定では、多電極と多芯ケーブルを用いて、測線設定（測量）を行ってから、図 2-2-2 に示すように予め全ての電極を設置し、これを自動に切替ながら自動測定を行うことで、効率化している。

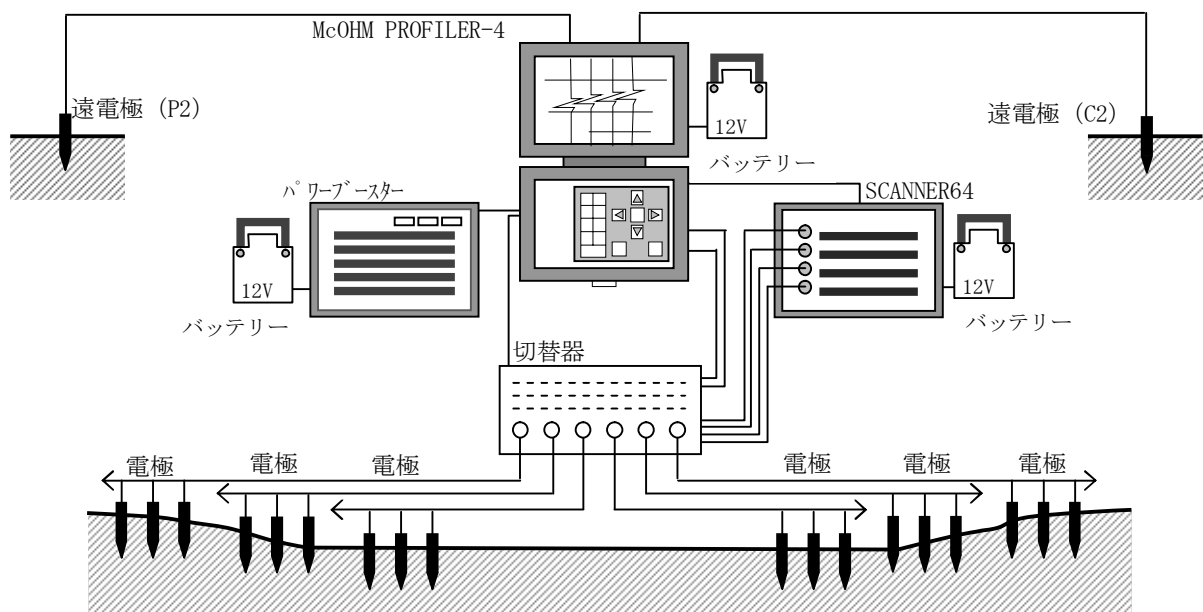


図 2-2-2. 多電極を用いた電気探査の測定概念図

(3) 解析手順

2次元解析の解析手順を図 2-2-3 に示す。

解析は、測定データ（実測値：見掛け比抵抗値）に各種の計算を施し、ある許容範囲内で実測値と理論値とが合致するような地下構造モデルを決定していくことである。2次元解析では測線沿いの測定データから、地下構造を2次元仮定（地下構造は測線と直交方向に変化しない）した比抵抗断面が得られる。

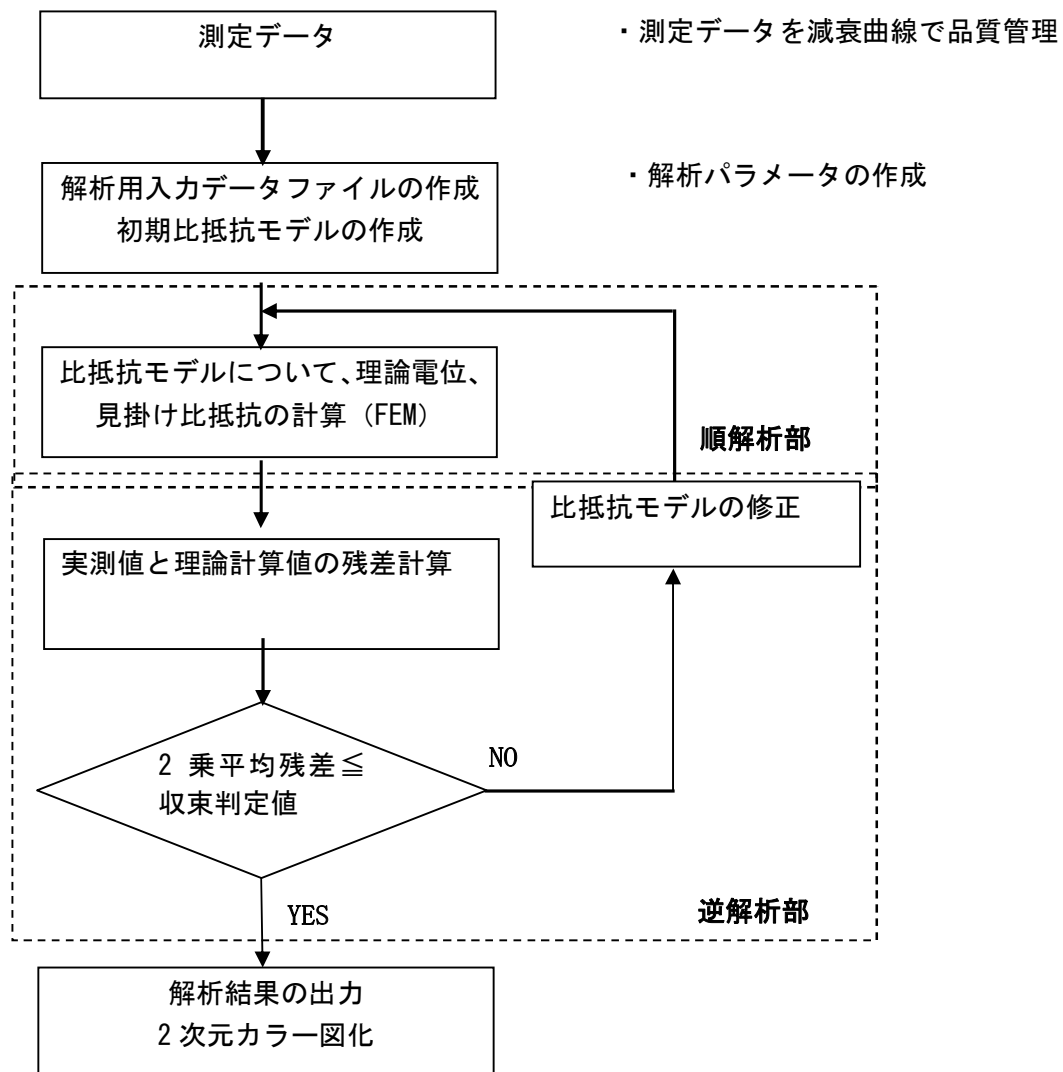


図 2-2-3. 比抵抗法 2 次元探索の解析手順

2-3. 機械ボーリング

機械ボーリングは、ロータリー式オイルフィード型で掘削した。この方法は、原動機によってボーリング機械のスピンドルを回転させ、ロッドを介して、ロッド先端に取り付けたコアチューブ及びメタル（ダイヤモンド）ビットによって、地盤を掘削する方法である。

掘進方向は、実施した2孔とも斜め60°下方で、掘削孔径はφ66mmとした。仕様は、オールコアボーリングとした。なお、良質なコアを採取するようコアの品質向上に努め、採取率についてもコアの流出・欠損の無いように最大限配慮した。

掘削は、自然水位が確認されるまで無水掘削を原則とするが、孔壁崩壊などで無水掘削不能な場合、清水もしくは泥水による送水掘削で行った。掘削中は、湧水・逸水や地質・土質の境界・性状などの変化に十分留意して実施した。

孔壁崩壊の恐れがある場合には、ケーシングパイプを挿入して掘削を行った。また、孔内水位は毎日作業着手前と、作業終了後に測定した。

採取した試料は、コア箱に入れて提出した。ボーリングで出現した地質・深度・コア性状の詳細は、ボーリング柱状図として取りまとめた。

ボーリングが終了した時点（現場作業完了）で、後片付け及び清掃を行った。

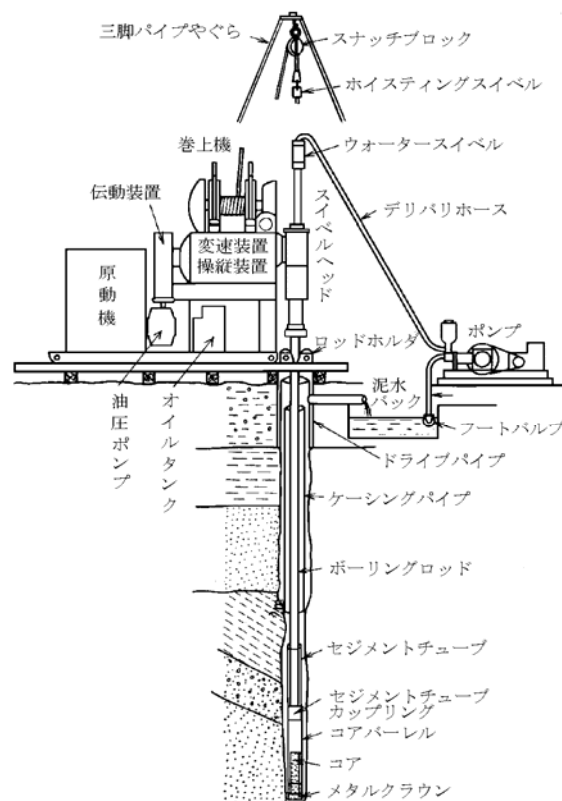


図 2-3-1. ボーリング装置図