

浅層反射法探査による湧水性トンネルの地山調査

平 間 邦 興 桑 原 徹
外 山 聡

Geological Survey along Tunnel Route with Groundwater Saturation According to Shallow Seismic Reflection Method

Kunioki Hirama Tohru Kuwahara
Satoshi Toyama

Abstract

This paper reports on the relation between geological structure inferred by the shallow seismic reflection method (SSR) before tunnelling and the definite structure ascertained after tunnelling. Discussion of the results with SSR was made possible from numerous viewpoints. There was a difference from simple correlation between results and boring core samples and valuable data were obtained. Accumulation of such data will contribute greatly to the firm establishment of SSR.

概 要

この報告は、トンネル地山の地質調査を浅層反射法で行ない、トンネル掘削により明らかになった地質状況との関係について検討した。このような方法は、ボーリングコア試料による単純な比較と異なり、浅層反射法探査の結果に関する多面的な検討を可能にし、貴重なデータをもたらした。このようなデータの蓄積は浅層反射法の確立に大きく寄与すると思われる。

1. はじめに

反射法による地盤探査は元来石油採掘のために開発された探査技術であり、その後いくつかの分野への応用が試みられた。地下十数mを対象とする反射法探査は、地下深部を対象とする石油調査などと比較すると、きわめて浅い部分を調査するために、特に「浅層反射法」と呼ばれている。

建設工事に関する地質調査で一般に用いられている「弾性波探査」は「屈折法弾性波探査」であり、ここで扱う「浅層反射法」との違いは解析に用いる波、すなわち実体波（P波・S波）の屈折波と反射波の違いに関係している。屈折法は地層境界を伝播する屈折波を利用し、往復走時曲線から測線間の地盤の平均的速度構造を求めるものである。一方反射法は、地層境界面で反射する反射波の位置、すなわち反射点を追跡して地層境界面の連続性を求めるとともに、各層の弾性波速度や深度を求めるものである。測定記録上での違いは、屈折法が記録の

初動を使うのに対し、浅層反射法は初動の後から到達する反射波をとらえるという点にある。

浅層反射法は、地表面で振動を発生させて地層の境界面で生じる反射波を地表に設置した1個ないし複数個の受振器で検出し、その記録波形を解析処理することによって地層の状態を特に平面の連続性として求めるものである。反射波は地層中をほぼ垂直に伝播するので、屈折波とは異なり地層の影響を横に広い範囲で受けることが少ない。従って地層の水平方向の分解能は屈折法よりも格段秀れている。浅層反射法では、測定は発振器—受振器の測定系全体を測線上で一定間隔ずつ移動させながら繰返し行ない、反射波の調査・解析を行なう。

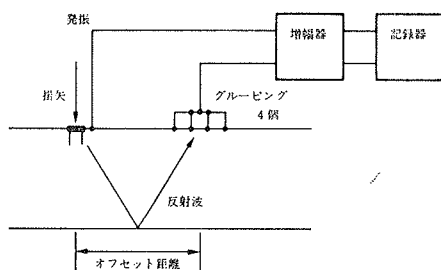
建設に関する地質調査で浅層反射法を実施する場合、その適正な深度は一般に50m以浅と考えられる。このような場合でも解析方法は石油調査などと基本的には同様であるが、実際の運用にあたっては地形の起伏・地質構造の凹凸・ノイズの増大・発振源の選択・解析の精度などが新たに解決すべき問題として提起されてくる。そ

ここで最近建設に関する調査を目的として浅層反射法の研究が行なわれており、我々も浅層反射法の可能性を検討してきた。我々の目的は施工現場にみられる多様な地形地質条件に対して浅層反射法の可能性や実用性を探ることにある。そのために比較的事例の多いマルチチャンネル浅層反射法と事例の少ないシングルチャンネル浅層反射法の両者を実施し、浅層反射法の多様化も試みている¹⁾。

浅層反射法の対象地盤としては沖積・洪積地盤、軟岩地盤、硬岩の風化帯などが考えられる。我々は造成工事における盛土とその基礎地盤の調査、防災工事における第三紀層地すべり斜面の調査、という二つの性状の異なる地盤で調査研究を行なってきた¹⁾。このようにさまざまな地形地質条件への対応という観点から、今回新潟県の北陸自動車道高峰トンネル東工区を利用して頂き、第三紀層の湧水性地山でのトンネル工事に際して浅層反射法を実施した。今回の調査目的は、①第三紀層軟岩の帯水層・不透水層の分布の解析、②解析結果と掘削によって明らかになった地質状況との比較検討、③地形的起伏の大きい所での反射波の状況、④深い地盤中での反射波の状態などである。この報告は特に不透水層である泥岩層の分布に関する解析結果と実際の地質状況との関係について検討した。

2. 測定方法

浅層反射法には大きく分けて、マルチチャンネル浅層反射法とシングルチャンネル浅層反射法とがある。両者はさまざまな点で異なる。地形地質条件からみると、マルチチャンネル浅層反射法は平坦地での水平構造に対して秀れた解析精度を示し、一方シングルチャンネル浅層反射法は簡易解析法であるが、地形条件にはあまり拘束されずに実施できる。測定作業量や解析処理量はマルチチャンネル浅層反射法で多いのでコスト的には高く、逆にシングルチャンネル浅層反射法では少ないので安いと言える。今回は調査地域が山岳トンネルであり地形的起伏がきわめて大きいため、主に地形的条件からシングルチャンネル浅層反射法を用いた。



図一1 測定システム

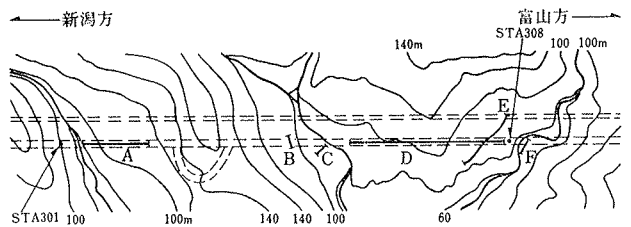
測定システムは図一1に模式的に示す。今回の調査では求めるべき最大の深度は約60mと予想されたので、人工震源としては挿矢を使用し、スタッキングを探査深度に合わせて4~16回実施してS/N比を向上させた。オフセット距離は6m、また受振点ごとの地表面の状態のばらつきを低減させるために、図一1のように各受振点ごとに4個の受振器を一つにまとめて結線して使用する「グループピング法」を採用した。測定する波はP波である。浅層反射法の測線は図一2に示す。測線は合計6測線、約550mであり、トンネルルートに沿ってあるいは直交するように設定した。測線ごとの測定条件は表一1に示す。

3. 解析方法

今回のシングルチャンネル浅層反射法の解析処理は図一3の流れに従って行なった。解析処理は大きく時間断面の作成と深度断面の作成に分けられる。これらの概要は以下のとおりである。

3.1. 時間断面記録の作成

反射波の波形記録はA/D変換後スタッキングと呼ぶ加算処理を行ない記録のS/N比を向上させる。次にバンドパスフィルター(今回は60~120Hz)を用いて記録中のノイズを除去する。また一般に反射波は直接波と比べるときわめて弱いのでそのまま図化しても反射波の識別は困難である。そこで1トレース中の全ての波形振幅の標準化を行ない、波形の見かけの振幅が記録中のどの時刻でもほぼ一樣な大きくなるような補正(AGC処理)を行なう。



図一2 調査の測線

測線名	測線長 (m)	オフセット距離 (m)	受振点間隔 (m)	スタッキング回数 (回)	トレース数
A	97	6	1	8-16	95
B	22	6	1	16	20
C	28	6	1	8	26
D	253	6	2	8-16	125
E	77	6	1	8	75
F	47	6	1	4	45

表一1 測定条件

反射波の検出の際にごく浅い地層からの走時時間は、直接波や表面波のそれと重なり合うため、反射波のピークの部分を読むことになり、反射波の初動時間を十分な精度で読むことは困難となり、発振時の補正が必要となる。また第2層以深からの複雑な波形記録から反射波を検出しやすくするために、反射波に最も影響を与える第1層を削除して測定系を第1層下部にあると仮想した処理操作（表層補正，ミュート処理）を行なった。さらにある測点の反射波記録に対してその隣り合った反射波記録を加算する（ニアトレス水平重合）と、同じ反射面からの反射波はお互いに強調しあって記録のS/N比が向上する。

3.2. 深度断面の作成

浅層反射法の深度断面（速度構造の断面）は時間断面記録に各層の弾性波速度を与えて求めることができる。反射面の深度はここでは副次的に実施した屈折法で得られた速度を用いて次のように計算できる。

n層の水平多層構造における反射走時 T_n は次式で表わすことができる。

$$T_n(\theta_1) = 2 \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{V_i \sqrt{1 - ((V_i/V_1) \sin \theta_1)^2}} \dots (1)$$

ただし、 Z_i : i層の層厚、 V_i : i層の速度、 θ_1 : 第1層への入射角。

ここで反射面の深度が大きくなると θ_1 は非常に小さくなるので、 $\sin^2 \theta_1 \doteq 0$ として近似する。よって i 番目の反射面（i層の下面）の深度は(2)式のように与えられ、オフセット距離の影響は反射面が深ければ無視できると考えられる。

$$D_i = Z_i + D_{i-1} = (T_i - T_{i-1}) \cdot (V_i/2) + D_{i-1} \dots (2)$$

D_i, D_{i-1} : i, i-1 番目の反射面の深度

一方反射面が浅い場合、たとえば水平2層構造ではオフセット距離が次のように関係している。

$$Z_1 = \sqrt{l^2 - (x/2)^2} \dots (3)$$

$$\sin \theta = x/2l \dots (4)$$

$2l$: 反射波の往復距離、 x : オフセット距離

また屈折法では初動から走時を読み取るのに対し、反射法では波形のピークやゼロクロス点を走時とすることはできないので、反射位相と屈折波の走時は原理的におよそ半波長程度の位相のずれを生じている。このずれは反射面が浅いと無視できなくなる。このずれの時間を t_0 、反射位相までの時間を t 、反射波の速度を V_1 とすると、求める反射走時 t' と反射面の深度 Z_1 は次のようになる。

$$2l = t' \cdot V_1 = (t - t_0) \cdot V_1 \dots (5)$$

$$Z_1 = \sqrt{\left\{ \frac{(t - t_0) \cdot V_1}{2} \right\}^2 - \left(\frac{x}{2} \right)^2} \dots (6)$$

今回は第1層/第2層反射面は(6)式から、それ以深の反射面は(2)式からそれぞれの深度を計算した。

4. 解析結果と地質状況

4.1. 浅層反射法の波形記録

各測線の時間断面記録は次のような特徴を示す。最も良い記録はE測線のもので、次にF測線であ

る。E測線は比較的単調な地形である。F測線は河川の河床に設置した。一般に河床の砂礫層のような未固結地盤では弾性波が伝播してくいが、ここでは砂礫層の上に薄いながらもシルト層が堆積していたため良好な記録が得られた。A, D測線は広い範囲で急斜面における記録を含むため、複雑な記録となっている部分が多い。

反射面に相当する反射位相は各測線で3~6層ほど認められ、浅い部分の反射位相は明瞭で連続性が良く、一方深い部分からの反射位相はやや不明瞭で連続性が乏しくなる。波形記録中の顕著な特徴は、低速度帯と考えられる波長の長い長周期の波の存在であり、A, D, E測線で認められる。後述するように、D測線の225~235 m区間とE測線の39~62 m区間にはそれぞれ90 msec前後から位相のそろった3回の長周期の波形、80 msec前後からの2~4回の長周期の波形が認められる。これらの位置から、低速度帯はE測線に沿って延びD測線にほぼ直交するものと考えられる。

4.2. 解析結果

各層の弾性波速度は測線により異なるが、およそ第1層が0.3~0.4 km/s、第2層以下は、第2層が0.8 km/sあるいは1.0~1.2 km/s、第3層が1.4~1.6 km/s、第4層が1.8~2.5 km/sの場合と、第2層が1.4~1.5 km/s、第3層が2.0~2.5 km/sの場合とがある。低速度層は2.5 km/s及び1.8~2.0 km/sの速度層の下部にあるので、いずれもこれらの速度以下と考えられる。地質断面全体を通じて考察すると、深度が増加するに従い速度層の連続性は失われている。すなわち反射面がしばしば不連続になりがちである。しかしこの不連続部分がすべて亀裂集中帯や断層とは考えられず、むしろ調査地点が山地で深い部分であるといった他の諸条件に負う所が

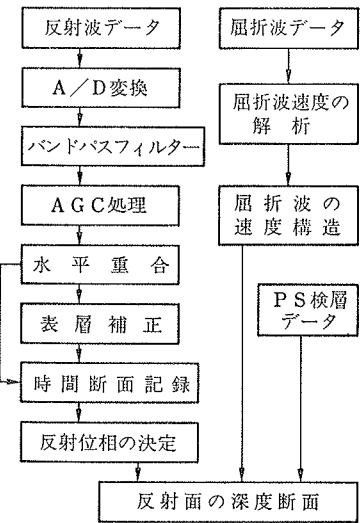
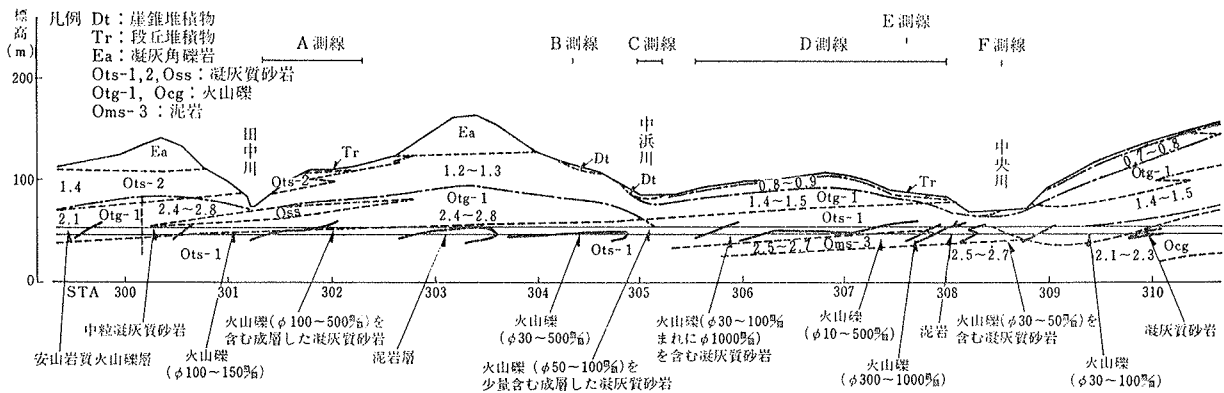


図-3 解析の流れ図



多いものと考えられる。

4.3. 地質状況

調査地域は日本海側の「グリーンタフ地域」にあり、背斜構造の翼部に位置して地層は一定方向に傾斜する単斜構造をなしている。調査部分は新第三紀中新世の鬼伏層中～下部層からなり、さらに安山岩質火山礫層の卓越する部分 (Otg-1, Ocg-3), 安山岩質凝灰岩 (Ots-1, Oss), 泥岩層 (Oms-3) など図-4のように細分できる。

トンネル掘削の結果によると岩相変化が著しく、レンズ状の泥岩・礫岩層が不規則にしばしばはさまれている。褶曲に伴う逆断層などの断層は認められなかった。

4.4. 浅層反射法探査の結果と地質状況

浅層反射法探査の結果と掘削によって明らかになった地質状況の関係についてはさまざまな要因を検討する必要があるがここでは次の問題点について特に考察した。今回の目的の一つは不透水層の泥岩層の分布を解析することであるが、D, E, F 測線では泥岩層などを鍵層として調査結果と掘削結果の比較検討をすることができた。これらは図-5, 6に示す。

(1) 各種調査試験による弾性波速度の整合性

地質断面の作成にあたっては、弾性波速度の値が反射面の深度に大きな影響を与えることになる。調査地域の地層の弾性波速度は、①火薬を用いた事前の屈折法探査、②PS検層、③コア試料の超音波速度、及び④浅層反射法では第1層の速度が各層の深度計算に与える影響が大きいので、表層を重視しながら反射法探査に合わせて実施した屈折法、から得られている。

トンネル施工面付近の弾性波速度は、②、③によると泥岩で1,700～2,100 m/s、凝灰質砂岩・火山礫質凝灰岩で1,500～2,200 m/s、火山礫で約3,000 m/sであり、また④によれば凝灰質砂岩で1,400～1,600 m/s、火山礫層で1,800～2,000 m/s、低速度層で1,800 m/s、泥岩層は1,400 m/s 層中にある。①によれば地層ごとの速度のばらつきが大きく、これはさまざまな岩種を含んだ地層の

平均的速度と考えられる。④の弾性波速度は②、③と比較するとほぼ同等か低い値となっており、解析用速度として妥当なものと考えられる。

(2) 反射面の深度と地質状況

事前のボーリング調査及び掘削によれば、明瞭な反射面はいずれも泥岩層の境界面に関係しており、厚い泥岩層の下面と凝灰質砂岩中の薄い泥岩層で生じているようにみえる。反射位相の出現と密接な関係を持つのは反射面の上下の地層の密度と速度である。すなわち反射面は物理的には音響インピーダンス $V\rho$ (V ; 速度, ρ ; 密度) が変化する境界面である。音響インピーダンスの変化は岩石の間隙率・組織・密度などの変化に起因するので、反射面は多くの場合岩質の変化に対応するものと考えられる。調査部分では音響インピーダンスの変化が必ずしも大きくない場合もあるので、泥岩層の境界面に関して必ずしも反射面が現われるとは言えず判断が困難である。しかし、音響インピーダンスが徐々に変化する場合にも反射現象が生じることが知られているので、今後の検討が必要である。

(3) 低速度層の水平的分布と地質状況

低速度層は解析時には約15 mの区間 (STA 307+65～80) にわたって現われ、断層あるいは速度の逆転層の境界面と考えられた。掘削結果によれば、断層は認められず、凝灰質砂岩～火山礫層と泥岩層の境がほぼこの低速度帯の位置に近いことが分かった。しかし地層境界 (STA 307+80～95) は解析結果とは約15 mずれていることになる (図-6)。この理由は各層の弾性波速度にも関係するが、低速度層の上面がトンネル施工面の下部に近いことから、両者の地層境界が施工面のすぐ下に緩く傾斜して存在するものと考えられる。

(4) 低速度帯の原因とその実態

STA 307+65から95までの約30 mの区間で反射波に大きな影響を与えそうな要因として次のようなものが考えられる (図-6)。すなわち、①泥岩層 (Oms-3) はそ

の上位の凝灰質砂岩/火山礫層に比べて速度が低いこと、
 ②STA 307+80~95 にかけては $\phi 300\sim 1,000$ m/m の大きな火山礫を含むレンズ状火山礫層の分布、
 ③泥岩層 (Oms-3) が STA 307+65~80 付近で急に尖滅する可能性、
 ④地表面と地層面の傾斜する方向が互いに逆のために生ずる反射波の S/N 比の低下、
 ⑤第4層である1.8~2.0 km/s 層の尖滅。

この中では①の可能性が最も大と考えられる。低速度層は速度の速い凝灰質砂岩/火山礫層から相対的に速度の遅い泥岩層へと波が伝播することによって生じたものであろう。地層境界面と解析で得られた低速度層の位置の水平的なずれは、解析に用いた速度が実際の速度よりも10%程度小さかったために生じた深度方向の誤差によるものと考えられる。また STA 307+65 から東側で低速度層が現われないのは、④の反射波の S/N 比の低下や、土被りの厚さからみて掛矢による浅層反射法の限界を越えたものかのいずれかの理由によると思われる。STA 307+80 から西側で現われないのは、⑤の泥岩層の真上の1.8~2.0 km/s 層がレンズ状に消滅したことにより、凝灰質砂岩~火山礫層と泥岩層全体が1.4~1.6 km/s 層となり、速度の逆転現象がなくなり低速度層自体がなくなったためと考えられる。

(5) 各測線における整合性

以上をまとめると泥岩層 (Oms-3) はその走向がE測線にほぼ平行で、その上面が低速度帯、下面が反射面として現われている。すなわち舌状の泥岩層の先端部分をD, E, Fの3測線が通過し、低速度帯や反射面からなる泥岩層の形が解析されたと言える。

5. おわりに

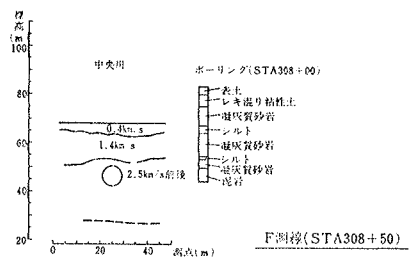
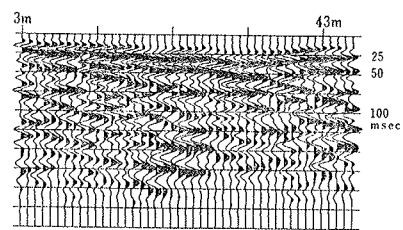
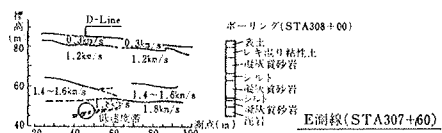
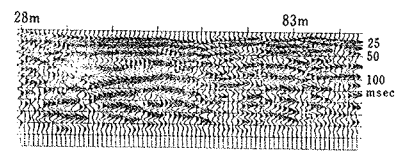
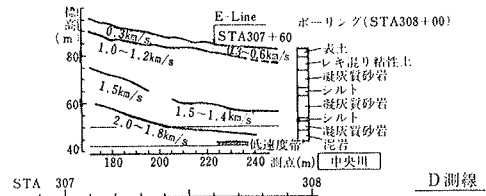
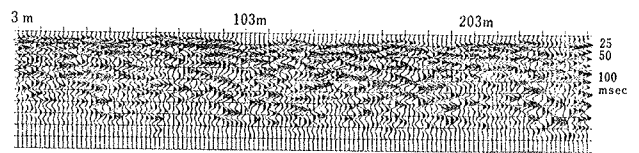
今回トンネルの掘削結果から浅層反射法の結果を検討した。これはボーリングコアによる単なる比較と異なり、多面的な検討を可能にし、貴重なデータをもたらした。今後もこのようなデータの蓄積が浅層反射法の確立に大きく寄与すると思われる。

謝 辞

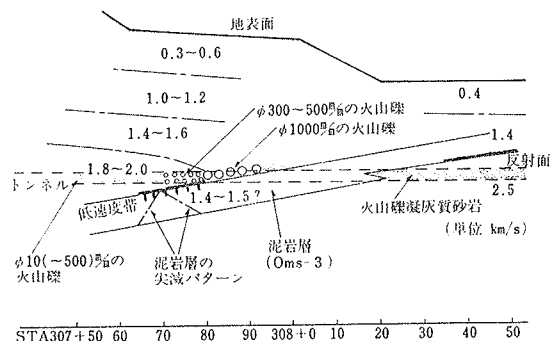
今回の研究にあたっては、日本道路公団糸魚川工事事務所ならびに(株)大林組高峰トンネル工事事務所の深い御理解を賜り、関係各位の方々の方々の多大な協力を得ました。ここに記して深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 平間邦興, 桑原 徹, 丸山 誠: 浅層反射法の地盤調査への適用性検討, 土と基礎, Vol. 35, No. 9, (1987), pp. 63~68



図一5 解析結果



図一6 解析結果と地質状況の関係を示す模式図